

欧姆社学习漫画

漫画 电子电路

〔日〕田中贤一 / 著

〔日〕高山 ヤマ / 漫画绘制

〔日〕株式会社TREND-PRO / 漫画制作

单美玲 / 译



科学出版社

www.sciencep.com

(TM-0519.0101)

责任编辑：王 炜 赵丽艳

责任制作：董立颖 魏 谨

封面制作：许思麒

用漫画这种形式讲数学、物理和统计学，十分有利于在广大青少年中普及科学知识。

周恩来、邓颖超秘书，周恩来邓颖超纪念馆顾问
中日友好协会理事，《数理天地》顾问，全国政协原副秘书长

赵燕

用漫画和说故事的形式讲数学，使面貌冷峻的数学变得亲切、生动、有趣，使学习数学变得容易，这对于提高全民的数学水平无疑是功德无量的事。

《数理天地》杂志社 社长 总编
“希望杯”全国数学邀请赛组委会 命题委员会主任

周国镇

用漫画的形式，讲解日常生活中的数学、物理知识，更能让大家感受到数学殿堂的奥妙与乐趣。

《光明日报》 原副总编辑
中华炎黄文化研究会 常务副会长

鲁 谨

科学漫画是帮助学习文科的人们用形象思维的方式掌握自然科学的金钥匙。

中国人民大学外语学院日语专业 主任
大学日语教学研究会 会长

成同社

在日本留学的时候，我在电车上几乎每次都能看到很多年轻的白领看这套图书，经济实惠、图文并茂、浅显易懂，相信这套图书的中文版也一定会成为白领们的手中爱物。

大连理工大学 能源与动力学院 博士 副教授

鲁 东

我非常希望能够在书店里看到这样的书：有人物形象、有卡通图、有故事情节，当然最重要的还有深厚的理工科底蕴。我想这样的书一定可以大大提升孩子们的学习兴趣，降低他们对于高深的理工科知识的恐惧感。

北京启明星培训学校 校长

启明星

书中的数学知识浅显实用，漫画故事的形式使知识贴近生活，概念更容易理解。

北京大学 数学科学学院 博士

张磊

科学出版社 东方科龙

<http://www.okbook.com.cn>
zhaoliyan@mail.sciencep.com

上架建议：科普/漫画

ISBN 978-7-03-027107-5



9 787030 271075 >

定价：32.00元

欧姆社学习漫画

漫画电子电路

〔日〕田中贤一 著
〔日〕高山ヤマ 漫画绘制
〔日〕株式会社TREND-PRO 漫画制作
单美玲 译

科学出版社
北京

内 容 简 介

《漫画电子电路》是欧姆社学习漫画系列之一。本书是以漫画的形式讲解电子电路基础的入门图书。通过大家熟知的半导体收音机的制作,为第一次学习电子电路的人们提供了毫无障碍的学习捷径。虽然书中有不少重要的公式,但是书中加入了公式的展开式,还用漫画和插图一步一步地进行说明,因此,原来抽象晦涩的知识变得让人容易理解了。如果您正为艰深的电子电路知识伤透脑筋,那么本书将能协助您快速掌握学习诀窍,取得突飞猛进的发展。

图书在版编目(CIP)数据

漫画电子电路/(日)田中贤一著;(日)高山ヤマ漫画绘制;(日)株式会社TREND-PRO漫画制作;单美玲译.—北京:科学出版社,2010
(欧姆社学习漫画)

ISBN 978-7-03-027107-5

I.漫… II.①田…②高…③株…④单… III.电子电路—普及读物 IV.TN710-49

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第054435号

责任编辑:王 炜 赵丽艳/责任制作:董立颖 魏 谨
责任印制:赵德静/封面设计:许思麒

北京东方科龙图文有限公司 制作
<http://www.okbook.com.cn>

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京天竺彩色印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010年5月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2010年5月第一次印刷 印张:11 1/2

印数:1—5 000 字数:184 000

定价:32.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

✧ 前 言 ✧

电子电路以电气电路为基础，加上半导体元件即二极管和晶体管，发展为复杂的集成电路。说身边的电器都是由电子电路组成的也不为过。

为了初步理解电子电路的内容，本书以“使用晶体管的收音机”为题材，用漫画来简单说明收音机是通过怎样的结构来发出声音的。从来，电子电路方面的书籍很多都是从简单的放大电路开始说明，并逐步接触到复杂的电路。但是，本书大胆地按照信号的推移，就是说从接收到的电波中选择想听的频道开始，直到收听到声音的流程来进行说明。理解收音机系统的同时，就会通过从电波到声音的信号流程而自然地理解电子电路。作者通过漫画中出现的高中生紫电透和江令木绫的角色来进行有趣的说明。

本书以我在大学中电子电路的讲义为基础进行简单的说明，工科高中的学生和初学者都可以充分理解其内容。

在制作本书之际，向负责漫画绘制的高山ヤマ，负责漫画制作的TREND-PRO 公司的诸位，以及给予我执笔机会的欧姆社的各位编辑表示感谢。而且，也衷心感谢购买本书的各位读者，同时，如果大家通过阅读本书对电子电路知识产生了兴趣，将是我莫大的荣幸。

田中贤一

目 录

序 章 怦然心动☆新会员

1

第 1 章 何为电子电路

9

☆ 1. 电子电路是什么

11

☆ 2. 各种电子电路

13

• 放大电路

13

• 振荡电路

14

• 调制电路

15

• 检波电路

16

• 滤波器

16

• 运算放大器

18

• 逻辑电路

19

• 电源电路

21

☆ 3. 以收音机为例

23

☆ 补充知识

27

• 运算放大器——最终的放大电路

27

• 逻辑电路

28

第 2 章 晶体管的结构

31

☆ 1. 何为半导体

34

• 硅的共价键

36

• P 型半导体

38

• N 型半导体

39

☆ 2. PN 结二极管

40

• 偏 压

41

• 整流电路

43

✧ 3. 双极晶体管	44
• PNP 型晶体极管	46
✧ 补充知识	54
• J-FET 的结构与原理	54
• MOS-FET	55
• 双极晶体管与 FET 的差异	56
 第 3 章 电气电路的知识	 57
✧ 1. 基尔霍夫定律	62
• 电路分析	62
• 基尔霍夫的第 1 定律和第 2 定律	63
✧ 2. RLC 并联电路	65
✧ 3. h 参数等效电路	67
✧ 补充知识	75
• 电压源与电流源	75
• 电压放大率	75
• 电流放大率	76
• 关于虚数 i 与 j	76
 第 4 章 调谐放大电路	 77
✧ 1. 调谐放大电路的原理	81
• 何为振幅调制波	83
• 振幅调制波的波形	84
✧ 2. 单一调谐放大电路	88
• 短 路	90
• 高频等效电路	91
• 寄生容量与镜子效应	92
• 高频等效电路的化简	95

☆ 补充知识	101
• 调谐放大器中的电流放大率的频率特性	101
• 晶体管的高频等效电路	103
• 阻抗的转换	105

第 5 章 检波电路 107

☆ 1. 检波与线性检波电路	110
• 检 波	111
• 线性检波电路	111
• 线性检波的原理	112
☆ 2. 包络检波	114
☆ 3. 滤波器	115
• 低通滤波器	115
• 高通滤波器	116
☆ 补充知识	122
• 关于 FM (频率调制)	122

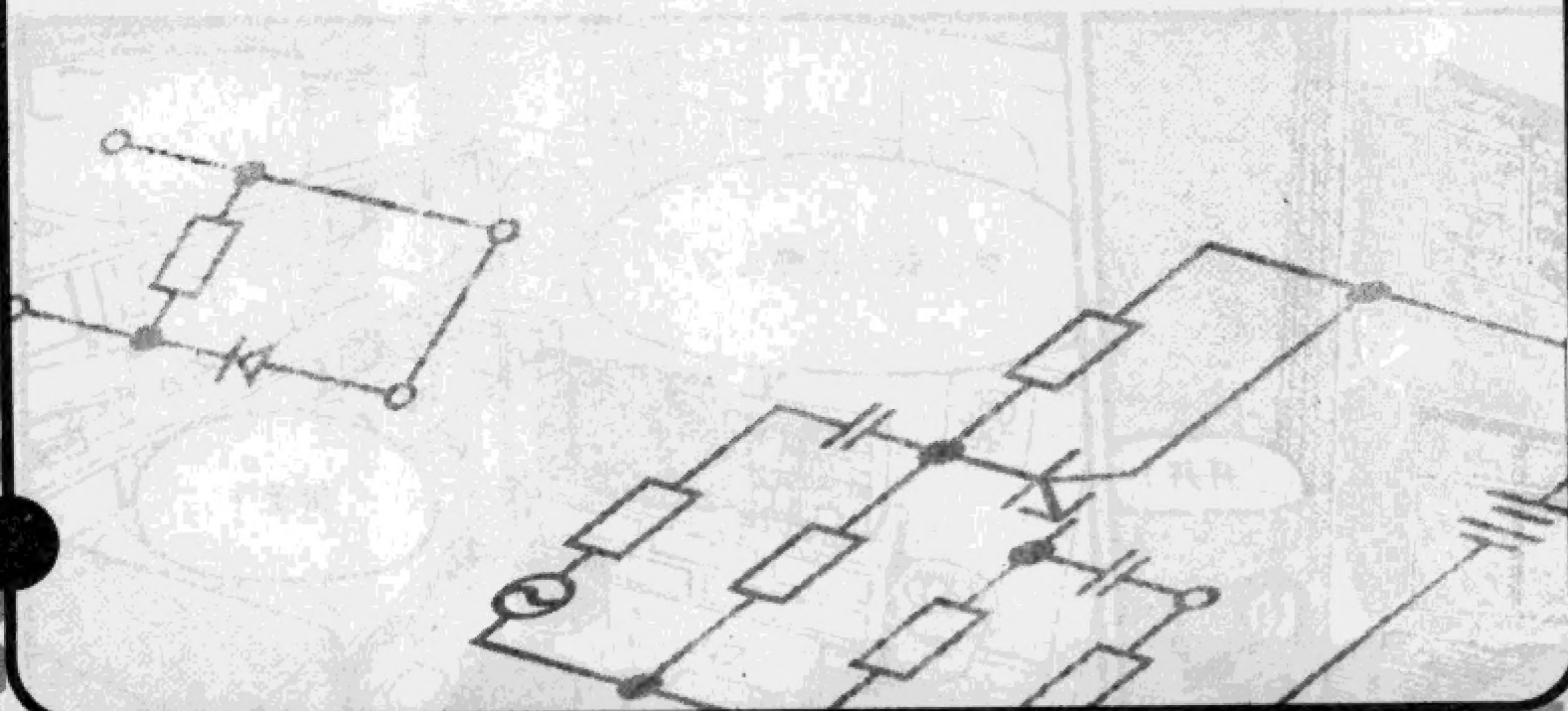
第 6 章 低频放大电路 125

☆ 1. 低频放大电路的概念	130
• 3 个类型的放大电路	131
☆ 2. 发射极接地放大电路	132
• 2.1 等效电路	133
• 2.2 偏压电路	134
• 何为静态工作点	136
• 最佳静态工作点	137
• 2.3 交流放大电路	138
• 交流成分的等效电路	139
• 2.4 电流放大率	141
• 基极接地电流放大率	143

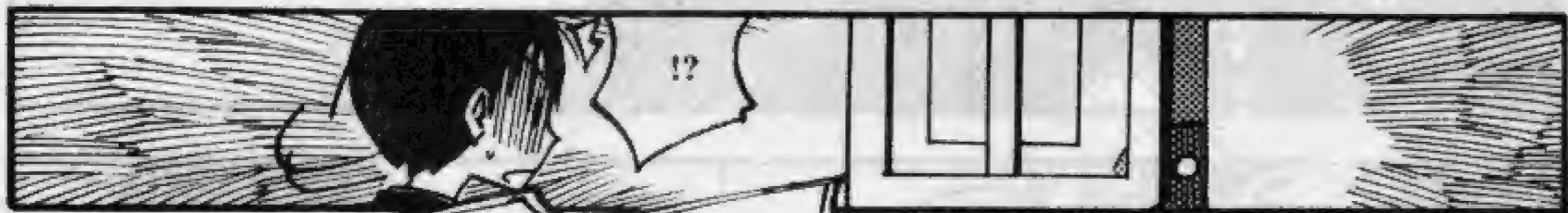
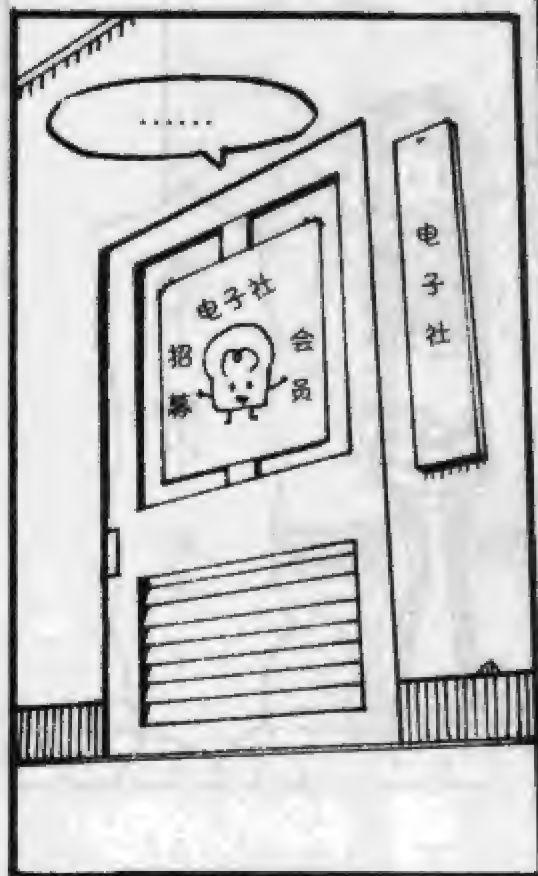
• 相位的反转	144
• 2.5 输入输出的阻抗	145
• 输入阻抗 $Z_{in}(1)$	145
• 输出阻抗 $Z_{out}(1)$	146
✧ 3. 集电极接地放大电路	148
• 3.1 发射极耦合电路	148
• 缓冲器	148
• 3.2 偏压的设定	150
• 3.3 交流等效电路	151
• 3.4 电压放大率和电流放大率	155
• 电流放大率	155
• 电流放大率	156
• 3.5 输入输出的电阻 (2)	157
• 输入阻抗 $Z_{in}(2)$	157
• 输出阻抗 $Z_{out}(2)$	158
✧ 补充知识	160
• 与分贝 (dB) 的关系	160
• 为什么发射极耦合电路是必需的	160
• 将发射极耦合电路级联连接	161
• 放大器的级联连接	162
• 放大器的高频特性	164

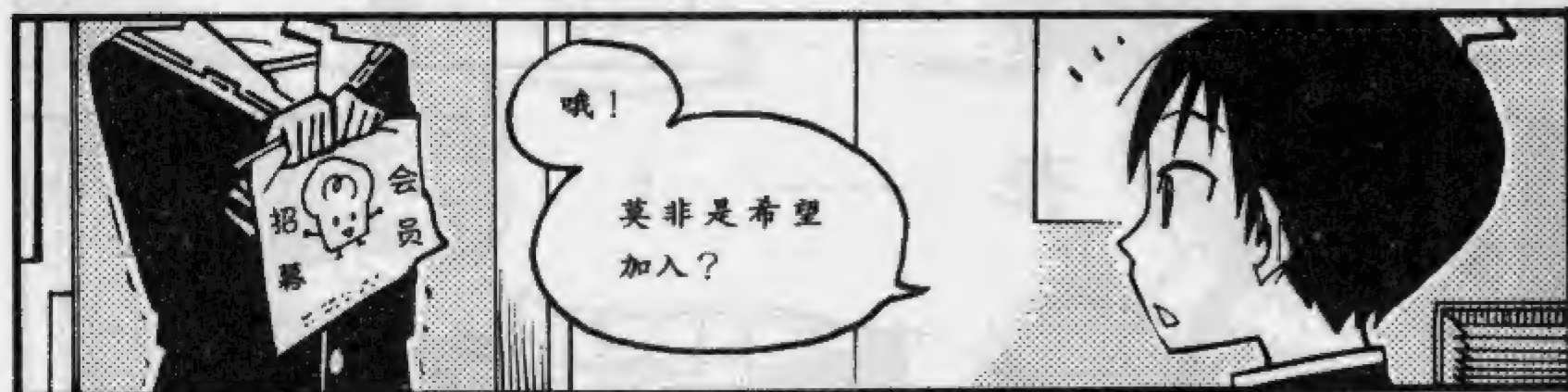
序 章

怦然心动☆新会员













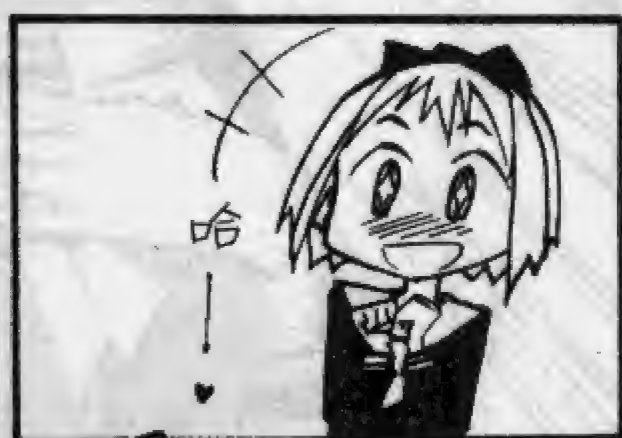
嗯，也就
是说，

你想入社，但完全没有这方面
的基础，希望我可以指导
你，是这个意思吗？

是的！
就是那样的。



嗯，好呀！



哈
！



但是，不行。

我真的是
什么都不
知道。



首先，是啊，先学会制作简单
的收音机吧！

那样就可以掌握电子电路的
基本知识了！

当

因为我会把各
种知识都教给
你的！



真，真的可以吗？

哈

当然！



虽然有点不好意思，
这个社团活动现在
只有我一个人在做，
一直是一个人，很
孤单来着。

我，
紫电透，
作为这个社团的代
表欢迎你的加入！



可以入社！！？
一直一个人！！？



那就是说如果我入了社，
只有我们两个人！？

啊
？！

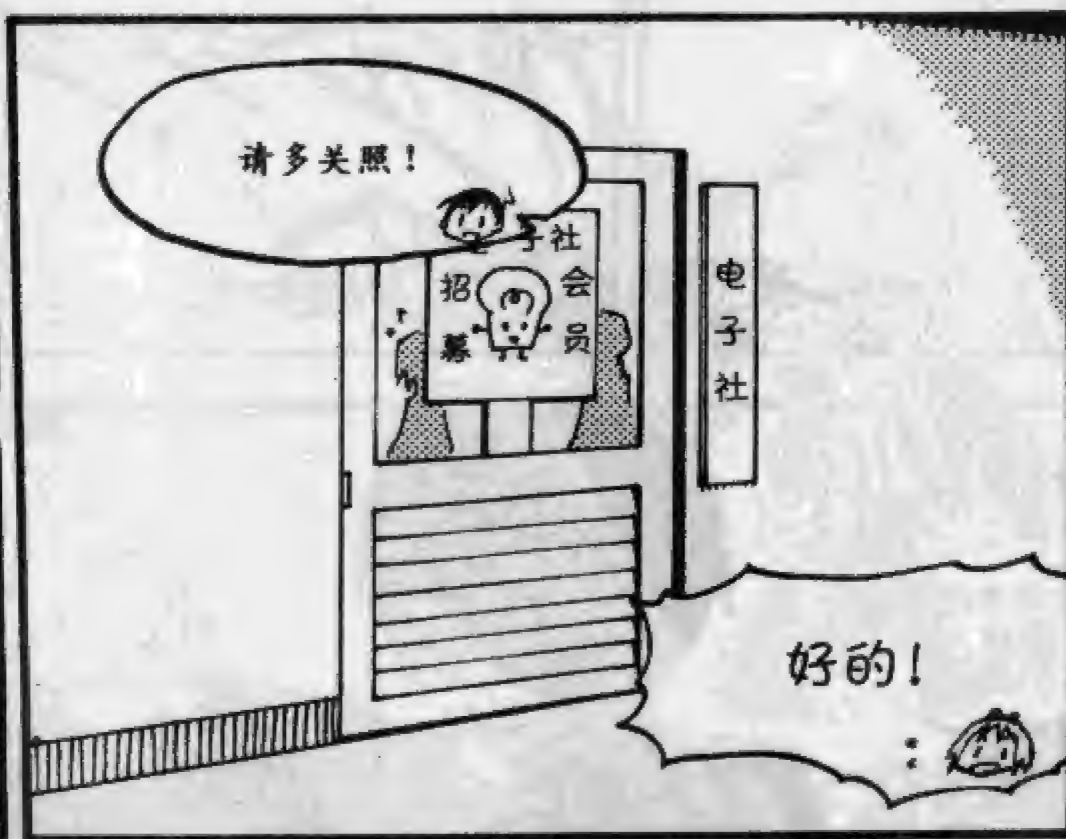


你？

没事吧？

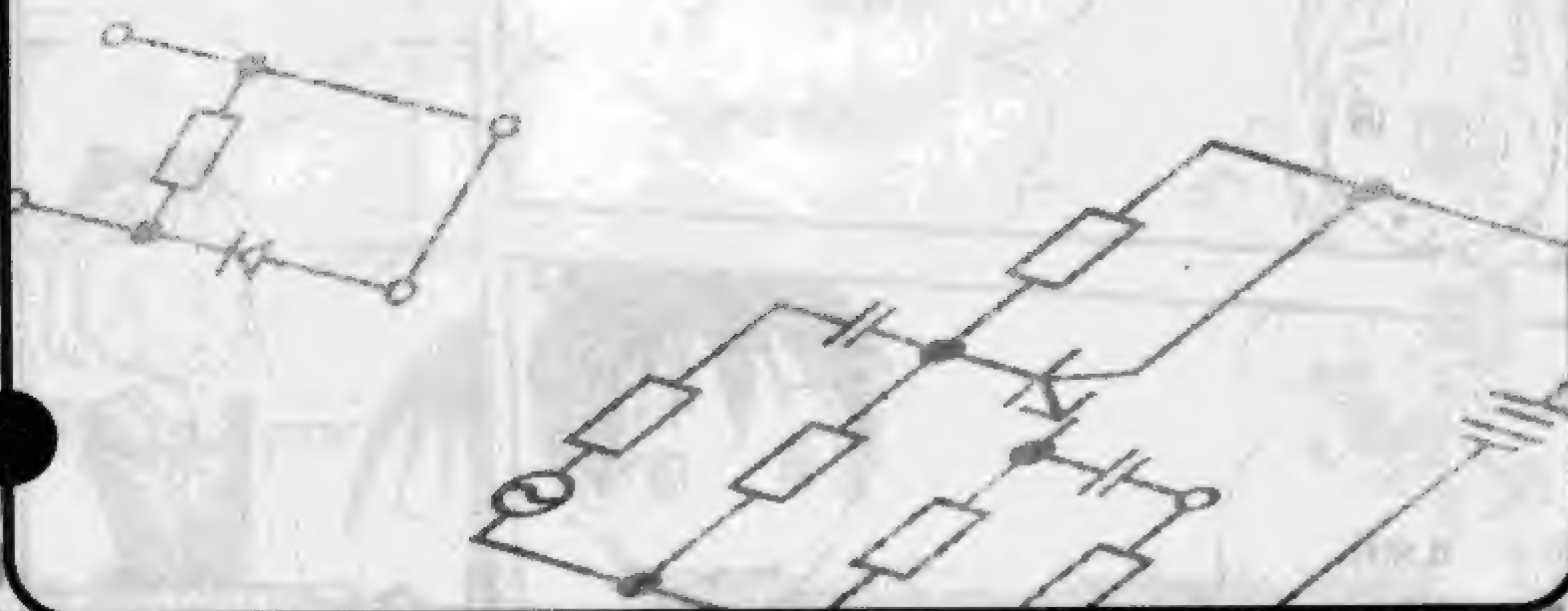
没，没关系。

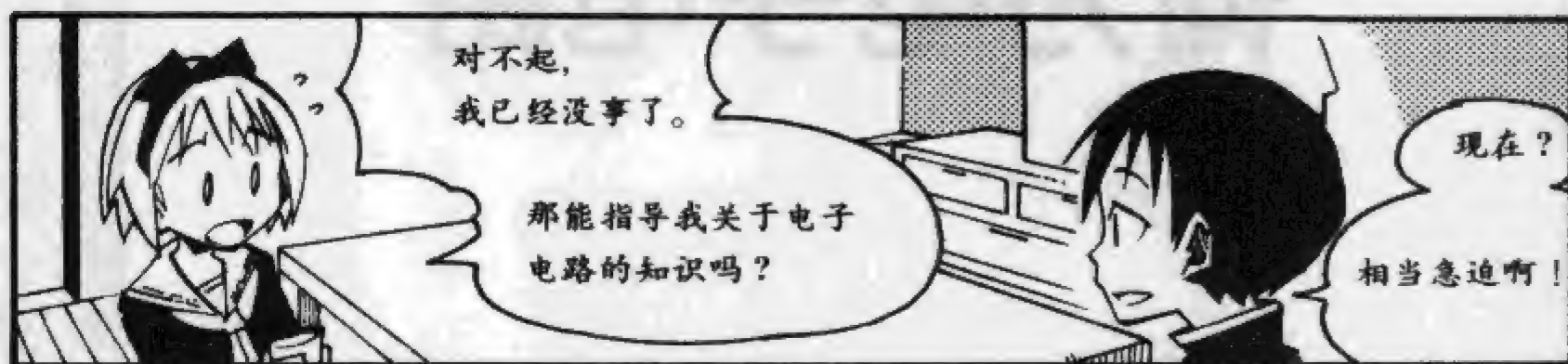
这人还真有点
奇怪……



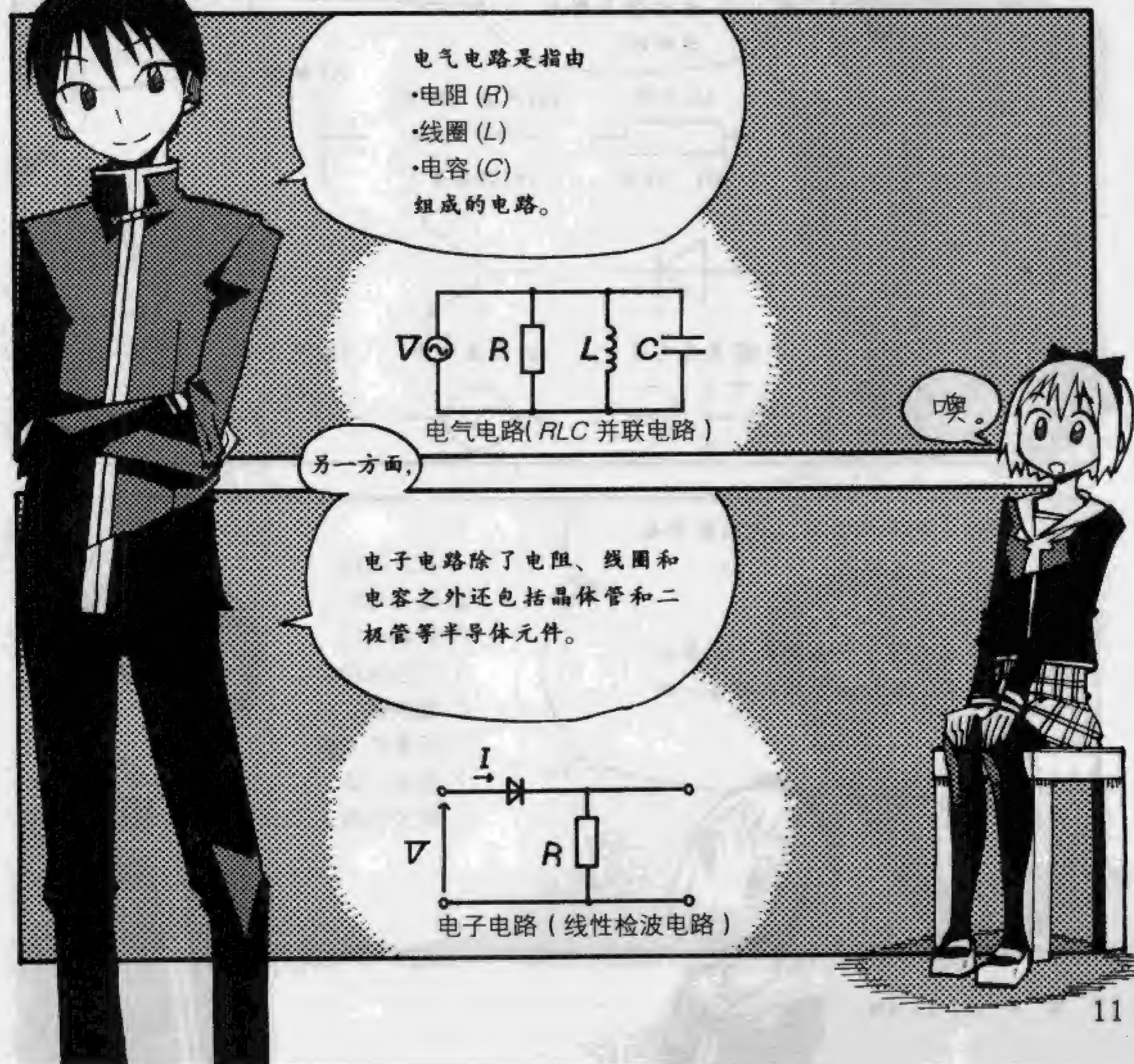
第1章

何为电子电路





1. 电子电路是什么



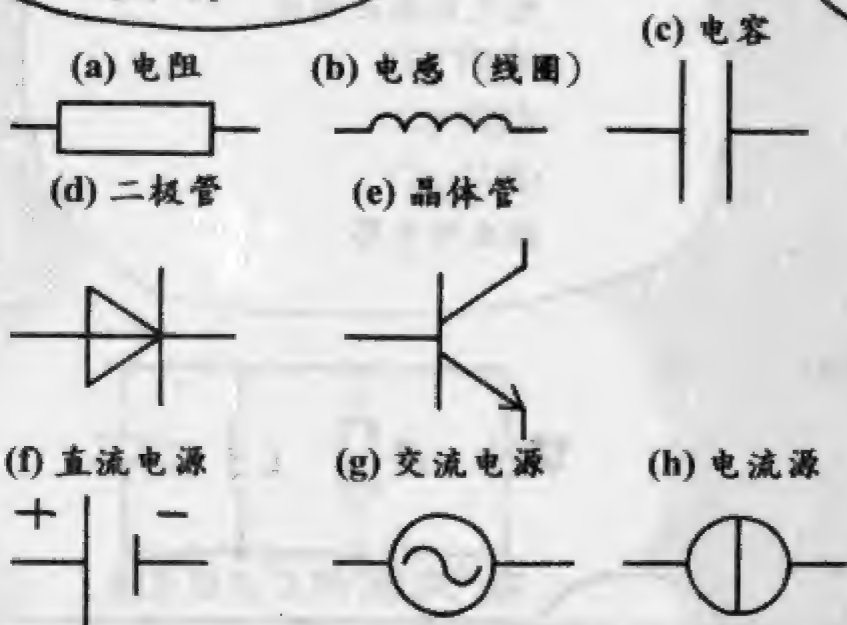
使用表格总结其差异的话就更为清晰了。

电气电路和电子电路所包含的元件的差异

元 件	单 位	电气电路	电子电路
电 阻	Ω (欧[姆])	○	○
线 圈	H (亨[利])	○	○
电 容	F (法[拉第])	○	○
二极管	(不唯一)	×	○
晶体管	(不唯一)	×	○
其他半导体元件	(不唯一)	×	○

把元件表示在电路图上则是这样的。

电路中的元件不一样啊！



明白了两者的差异，我们就开始说明电子电路吧。

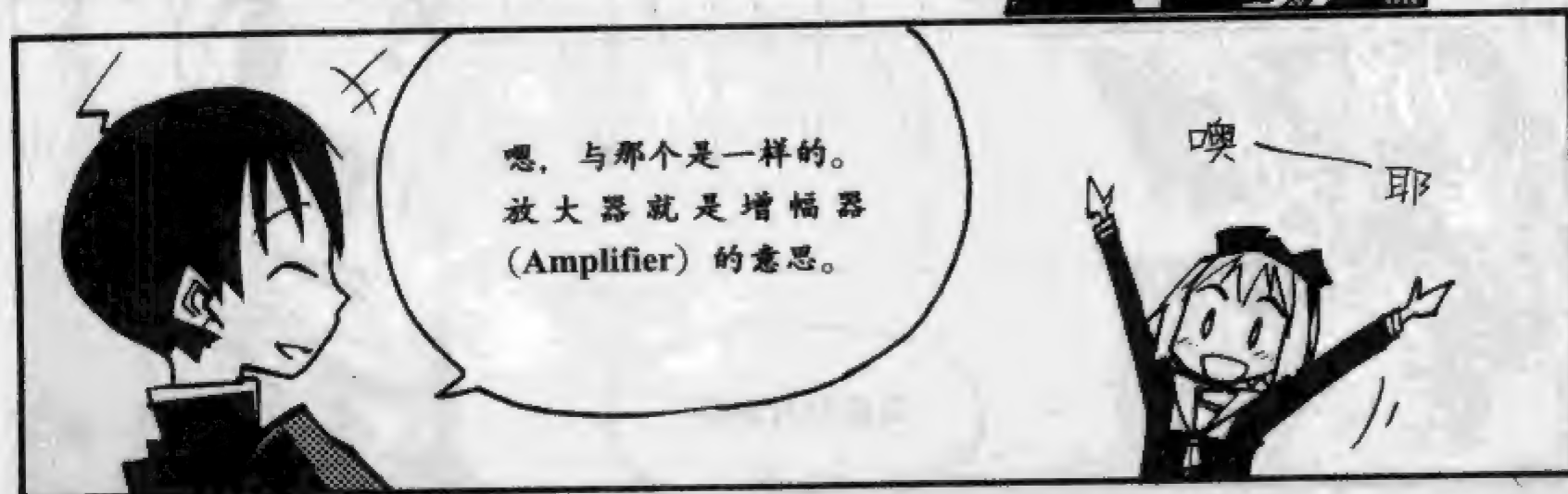
电子电路有各种各样的，大体分为8种。现在我开始说明每一种的特征。

- ① 放大电路
- ② 振荡电路
- ③ 调制电路
- ④ 检波电路
- ⑤ 滤波器
- ⑥ 运算放大器
- ⑦ 逻辑电路
- ⑧ 电源电路

嗯

2. 各种电子电路

〈放大电路〉



〈振荡电路〉

下面是
振荡电路。

那是指会振荡的
电路吗？

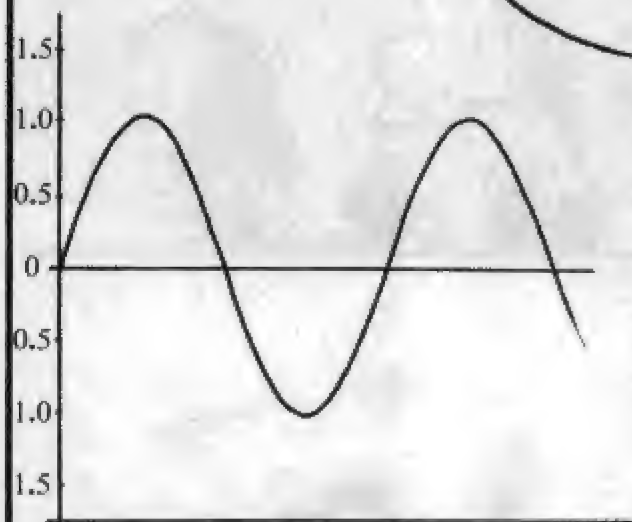
嘿，不是那样的。

所谓振荡
电路

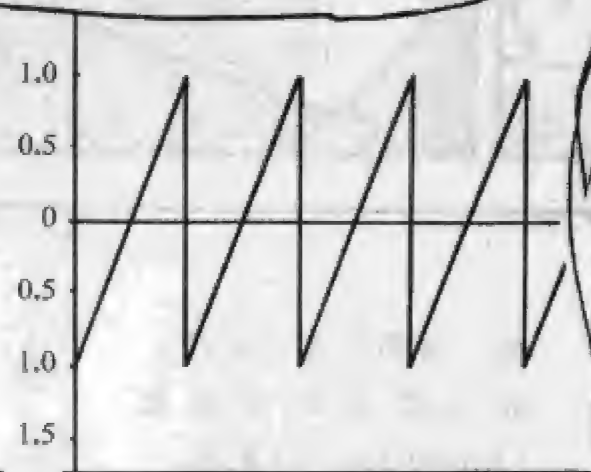
就是能够在没有任何
输入信号的地方产生
交流信号，应用在手
提电话等方面。

哦！

可以形成正弦波和锯齿形波等周
期波！



正弦波



锯齿形波

真是很方便啊！

第3个是
调制电路。

向电视和收音机输送声音
信号时，必须使用高频电
路输送信号。

调制电路是可调制振动大
小或频率的电路。

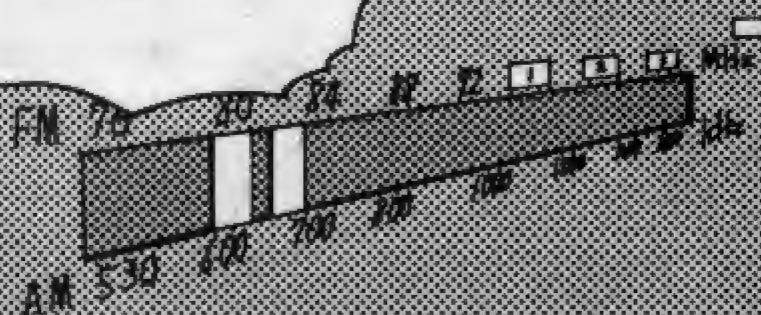
哦！

是那样啊？

附带说一下，

振幅的调制为AM，频
率的调制为FM，
这样比较容易记吧。

是说收音机吧，那
样的话，我明白。



〈检波电路〉

第4个是检波电路。它是从电视或收音机接收到的信号中提取声音等的。

因为是恢复其原状，
所以是检波。

是的。

〈滤波器〉

接下来是
滤波器。

举例来说关于滤
波器是什么的话

收听想听的广播节目时，
怎样收听？

嗯，嗯。

首先，先戴上耳
机，隔绝与外界
的接触。

我现在只感
觉到耳朵的
存在。

因而才可以说做好了
将精神完全投入到广
播世界的准备。



< 运算放大器 >

接着是第6个，

运算放大器。

这个叫做 操作电灯。

电
灯
？

与放大电路
不同吗？

运算放大器是集
成电路的一种，

作为放大电路具有
很高的性能。

是的。

运算放大器作为一种放
大电路来使用，其输入
一侧和输出一侧可以做
到互不影响。


利用此点，可以做出微
分电路、积分电路、振
荡电路。

微分……
积分……


同心协力就
可以做很多
事情啊。

就是如此。



- 
1. 计算加法的电路
 2. 计算乘法的电路
 3. 记忆数字和文字的电路

逻辑电路的特点主要就只是这些。



只有这些吗？

嗯，很简单吧？

其实，电脑中密密
麻麻地进行工作着
的正是逻辑电路。

哇！

啊，是那样啊。

啪

啪

啊啊啊

最后是
电源电路。

我想这个你是
明白的。

那是什么呀？

身边的东西如
AC 接头。

接头！
是机器的电源？

是的，它可从电源电路插座中提
取出交流电，然后转换成直流电。

哇！

为了将交流电转换成直流电，通过能去掉负电压成分的整流电路后，在平滑电路上使电波平稳。

必须输出一定的直流电压。

整流

(a) 交流电

(b) 直流电

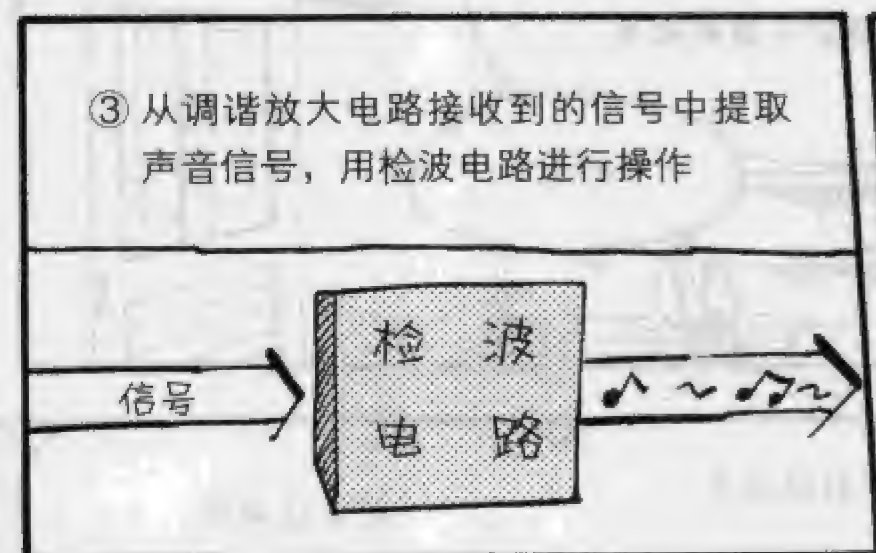
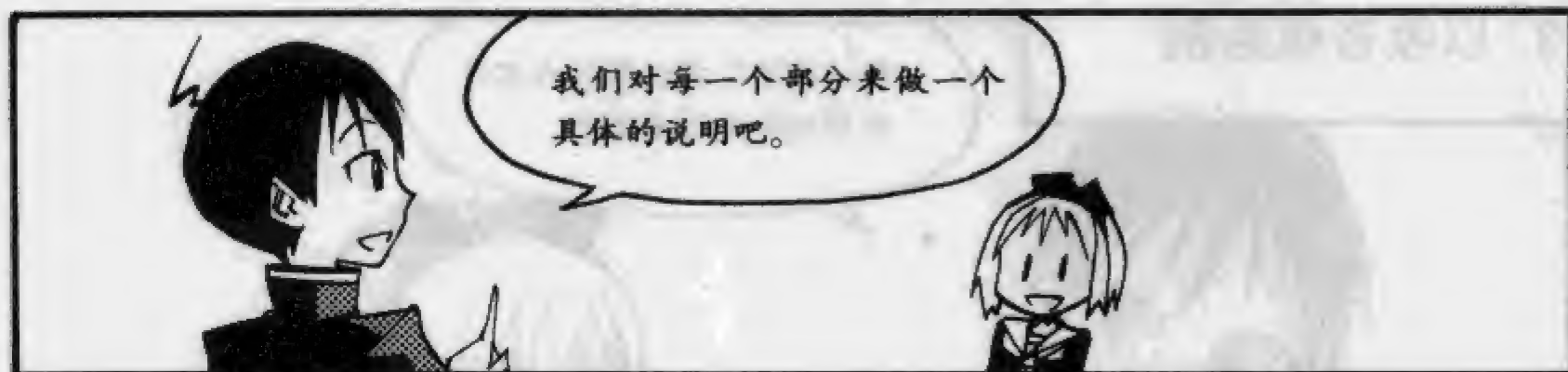


要在 AC 接头进行这样的操作。



3. 以收音机为例









补充知识

运算放大器——最终的放大电路

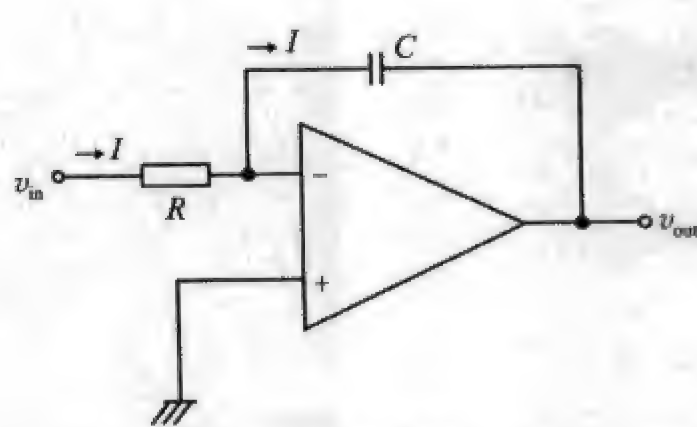
图 1.A1 表示运算放大器。运算放大器的特征可概括如下：

1. 放大率非常高 ($A \geq 2 \times 10^5$)。
2. 假设接地是成立的 (将 v_+ 的电极接地, v_+ 与 v_- 的电位差可以看作为 0)。
3. 低输出电阻 (上述 2 成立的前提条件)。

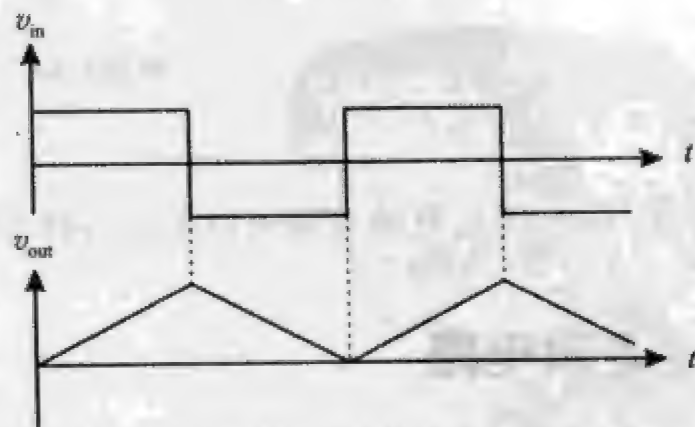
利用这 3 个性质可制成各种各样的电路。例如, 图 1.A2 所示, 通过连接 R 与 C 可组成积分电路。也就是说, 具有这样的特性: 输出电压与输入电压的积分值成比例关系。而且, 将图 1.A2 的积分电路中的 R 与 C 互换的话, 则变为微分电路。



● 图 1.A1 运算放大器的构成图

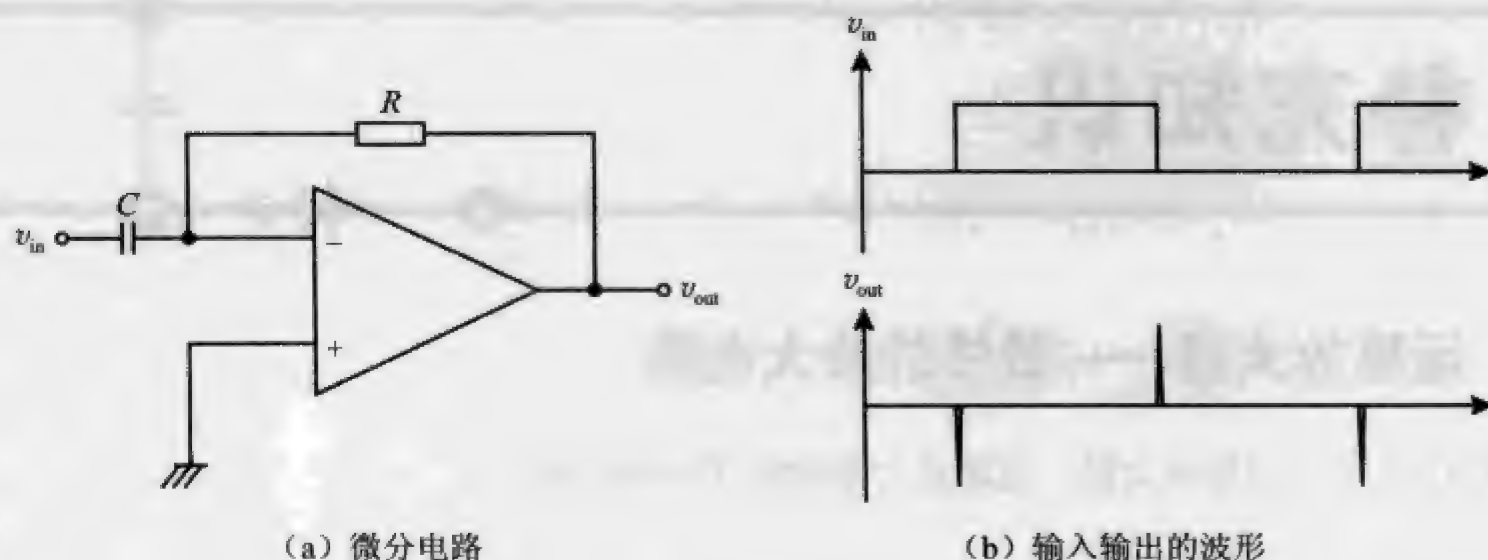


(a) 积分电路



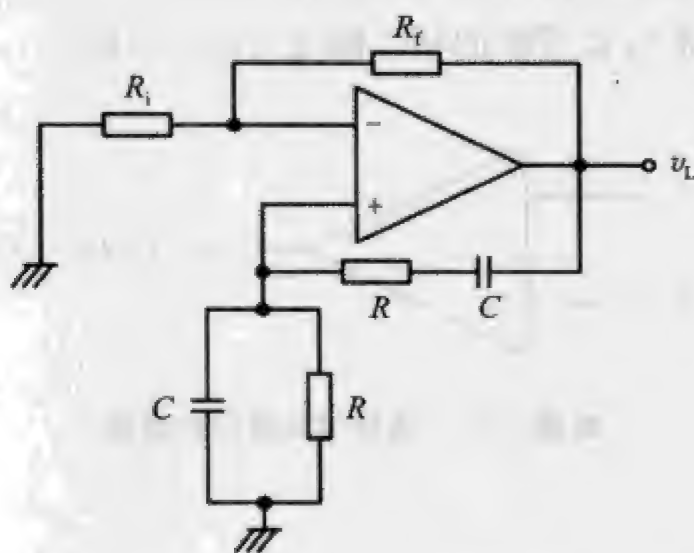
(b) 输入输出的波形

● 图 1.A2 积分电路



●图1.A3 微分电路

同时，图 1.A4 表示的是韦氏电桥振荡器。它虽只是输出电压对输入电压的反馈，但实际的输出为正弦交流电。据说工科高等院校实验室里的交流振荡器大多都是这样的电路。

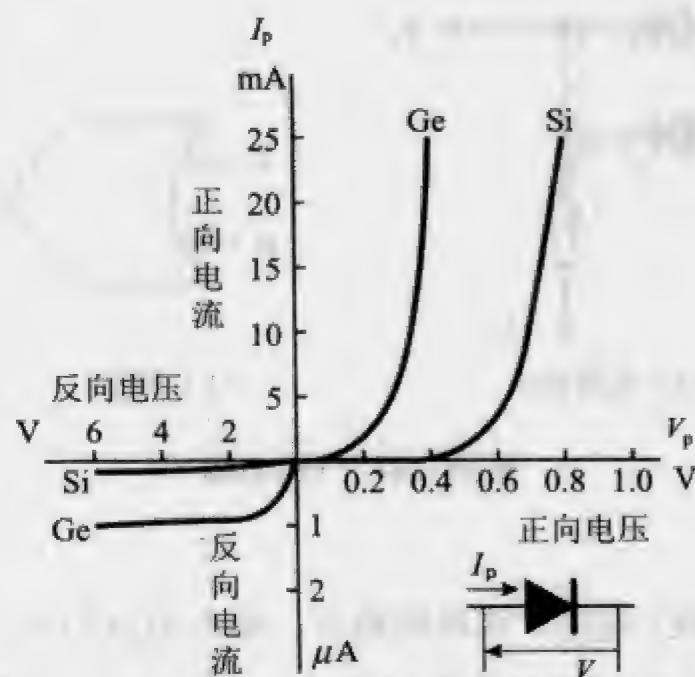


●图1.A4 韦氏电桥振荡器

这样，利用运算放大器可以形成各种各样的电路。

逻辑电路

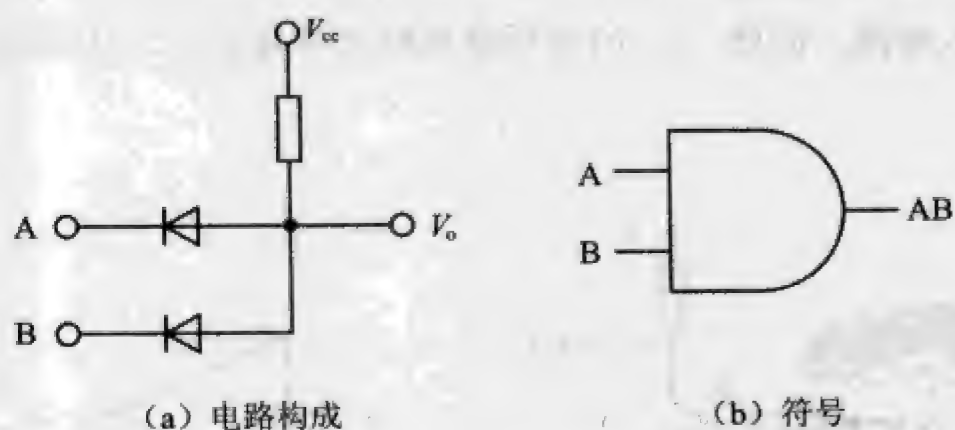
如前面所述，所谓的逻辑电路就是计算机中表示 0 与 1 的电路。在这里，所谓 0 是指 0V(伏[特])的低电压，1 是指 5V(伏[特])的高电压，将这两种电压作为信号来处理（这称为正逻辑）。因此，由逻辑电路构成的电路有时被叫做数字电路。



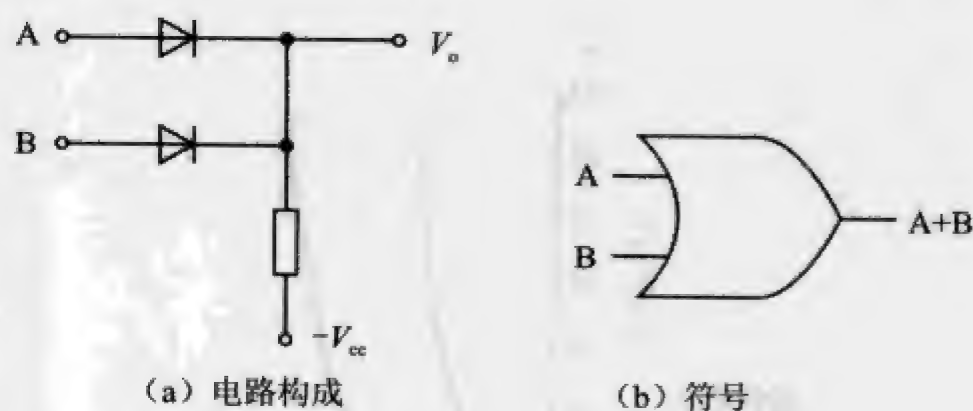
●图1. A5 二极管

图 1. A5 表示的是二极管。二极管具有电流只在三角符号的方向流动，不在其相反方向流动的特性。利用此特性，可以形成进行或门 (OR) 及与门 (AND) 的电路。

图 1. A6 显示的是逻辑与门 (AND) 电路。A 与 B 同为 1 时，输出 V_o 则为 1。也就是说，A 与 B 同为 1 时，二极管内因正向电压不发挥作用而不导电， V_{cc} 的电压就是原有的 V_o 。如果某一个输入电压为 0 时，二极管内会导通，二极管两端的电压会变小， V_o 会变为 0。



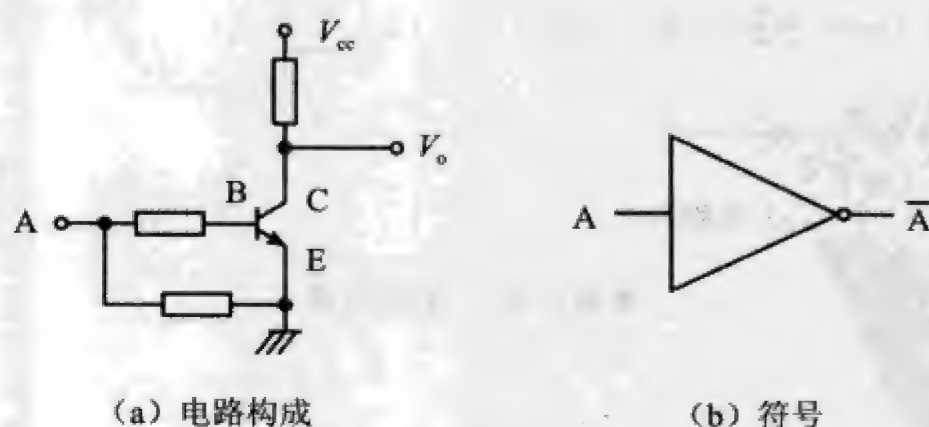
●图1. A6 AND电路



●图1.A7 OR电路

图 1. A7 是逻辑或门(OR)电路。这种电路中,输入电压的某一方是 1 的情况时,输出电压则为 1,输入电压全都为 0 时,输出电压也变为 0。输入电压全都为 1 时,二极管导通, V_o 会变为 1。输入电压任何一个为 1 时,在输入电压为 0 的地方,二极管会导通, V_o 会变为 0,但是,在输入电压为 0 的地方,二极管则不会导通。而且,输入电压双方都为 0 的情况时,电流通过二极管向 $-V_{cc}$ 导通,所以输出电压变为 0。

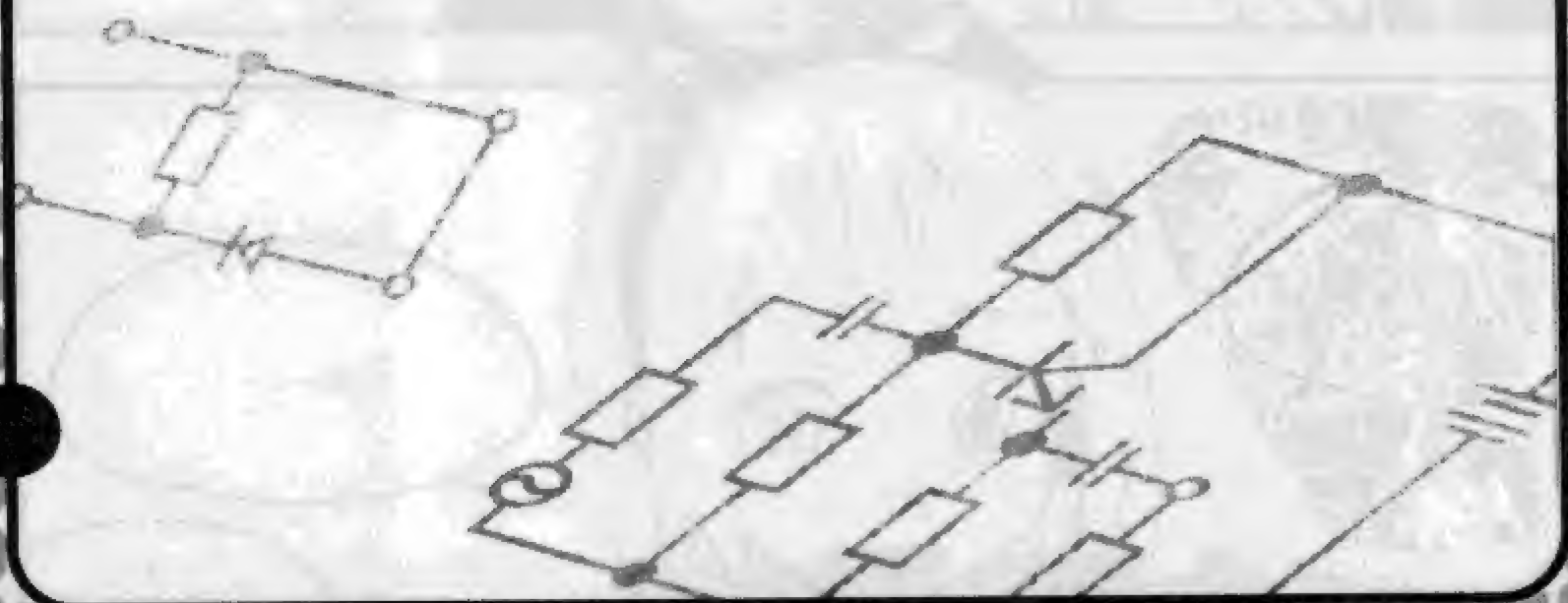
图 1. A8 是非门(NOT)电路。输入电压为 0 时,输出电压则是 1,输入电压为 1 时,输出电压则为 0。这种情况下,因为二极管与电阻不能组合,使用晶体管来代替二极管。向 A 输入电压 1 时,晶体管的基极和发射极之间流着正向电流,因此从 V_{cc} 出发,经由集电极向发射极流入电流。这时,集电极和发射极之间的电压为 0,所以 V_o 则变为 0。与此相反,向 A 输入电压 0 时,晶体管的基极和发射极之间不是流着正向电流,所以不能从 V_{cc} 出发经由集电极向发射极流入电流。因此, V_{cc} 的电压就那样被传递到 V_o ,因此向 A 输入电压 0 时, V_o 则为 1。



●图1.A8 NOT电路

第2章

晶体管的结构







1. 何为半导体



首先,

将电流容易流过的
物质叫做导体, 如
金属。



导体

另一方面,

玻璃与橡胶等电流不
容易流过的物质叫做
绝缘体。



绝缘体

所谓半导体是指具有二者之
间性质的物质。

用于晶体管的硅或锗
就是半导体。



二者之间……

〈硅的共价键〉

硅是周期元素表中的IV_A族元素,在最外层上具有4个价电子。

而且,每个原子都互相发出4个价电子从而形成共价键的结晶。

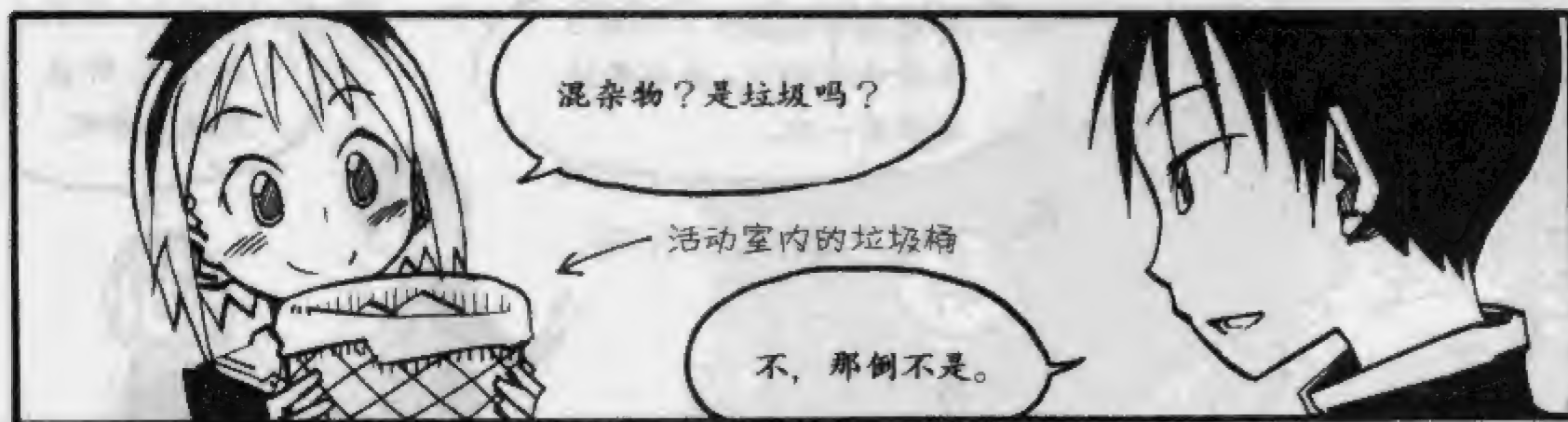
用人来打比方的话,就是互相之间紧紧拉着手的状态。

那样的状态,你能明白吗?

嗯
嗯

在这样密集地状态下,可自由活动的电子——自由电子会变得非常少,所以很难通电。

因此,
掺入混杂物才会变得容易通电。



这里所说的混合物是指周期表中的Ⅲ_A族元素和Ⅴ_A族元素。

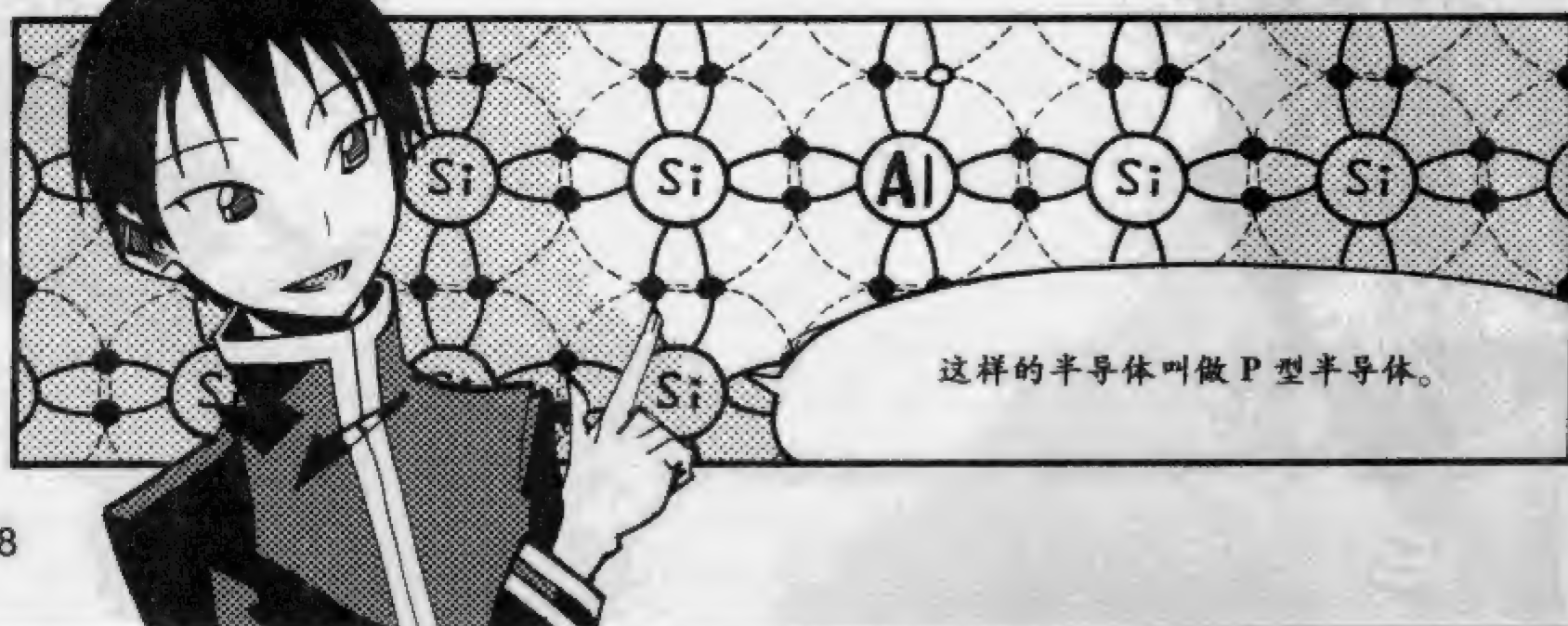
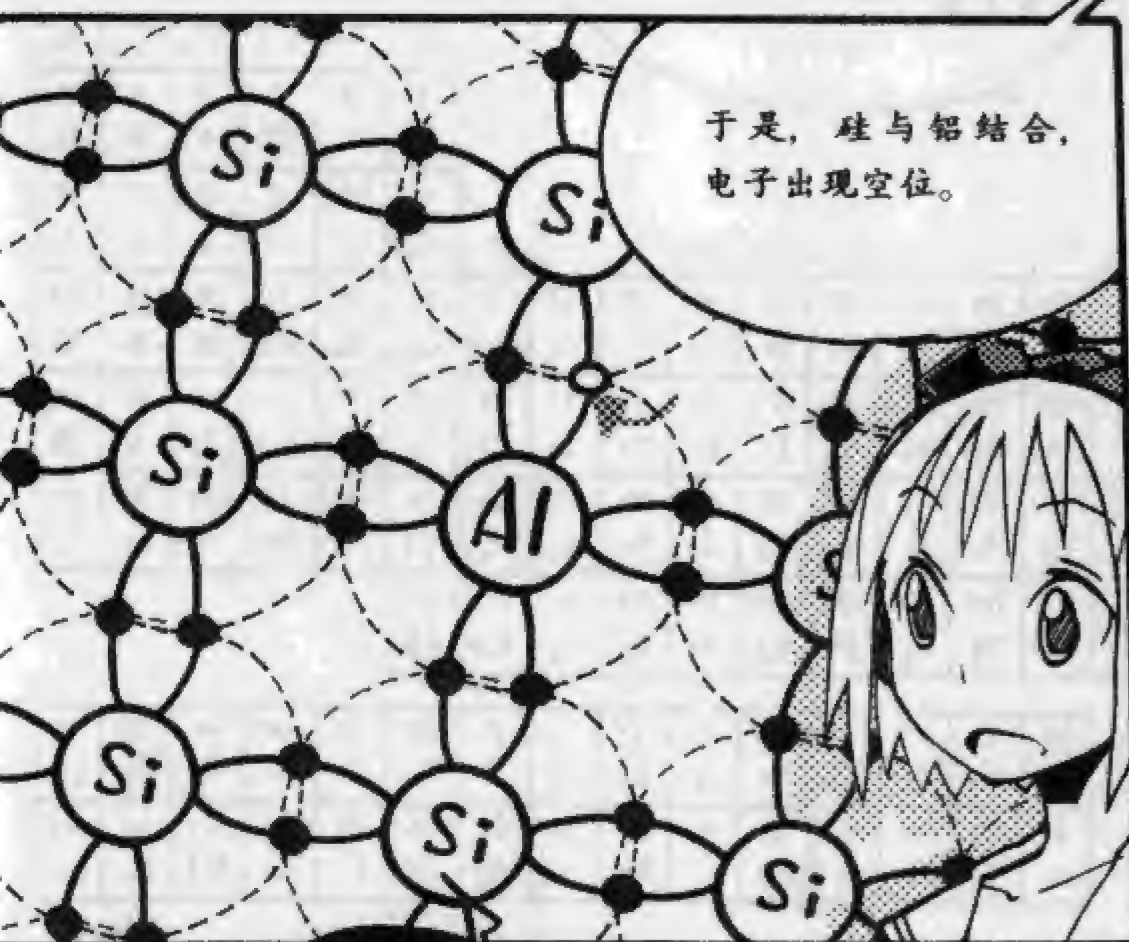
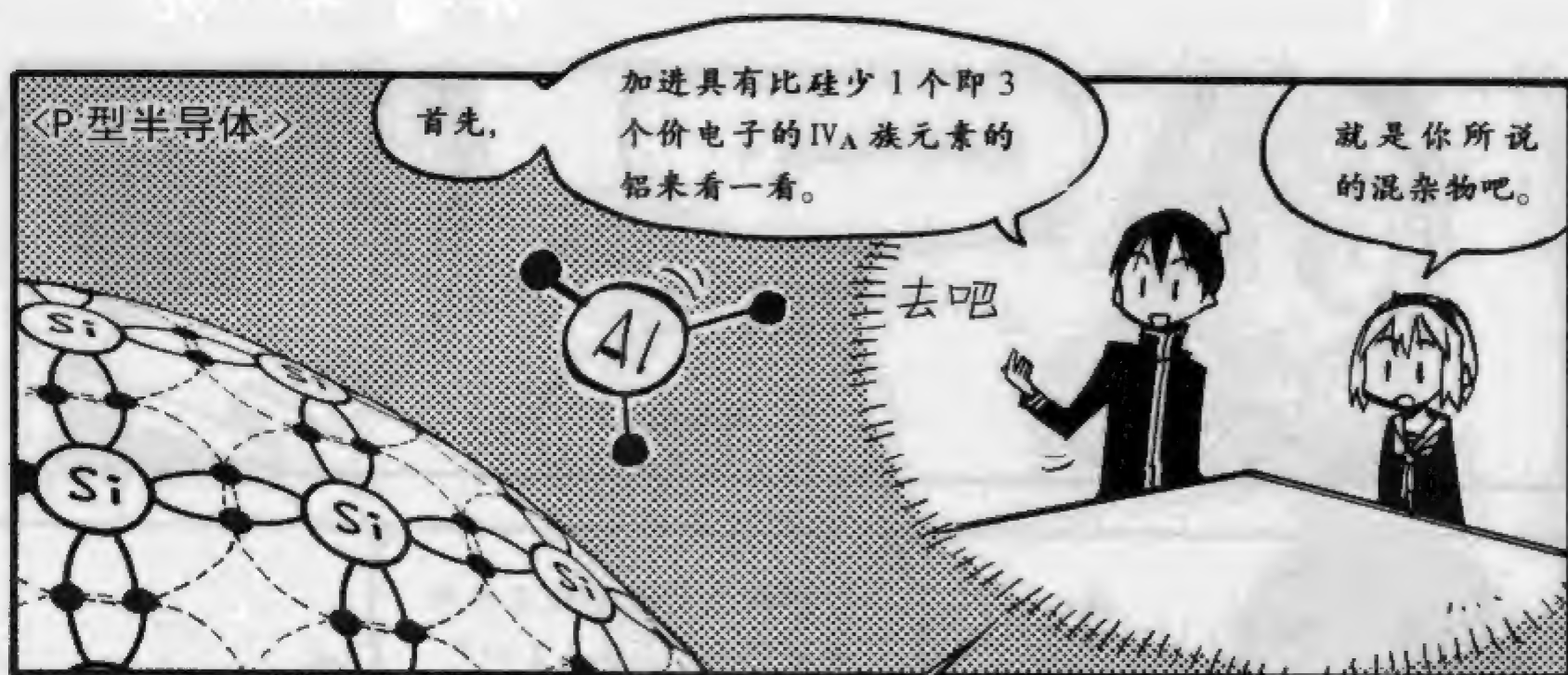
族	Ⅰ _A	Ⅱ _A											Ⅲ _A	Ⅳ _A	Ⅴ _A	Ⅵ _A	Ⅶ _A	Ⅷ _A	
周期	1	2											3	4	5	6	7	8	
1	H																		He
2	Li	Be											B	C	N	O	F	Ne	
3	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar											
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
6	Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
7	Fr	Ra		Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Uue	Uub	Uut	Uuq	Uur	Uus	Uuo	

镧系元素

57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu

锕系元素

89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr



<N 型半导体>

接下来，

加进具有比硅多1个即5个价电子的VA族元素的磷来看一看。

嗯

于是，硅与磷结合，剩下1个价电子并变成自由电子。

这里的自由电子由于过剩，就会自由地四处活动。

因此，半导体的导电性也会上升吧！

就是那样的。

这样的半导体叫做N型半导体。

啊！

2. PN 结二极管



< 偏 压 >

那二极管有什么特征啊？

嗯。

吓死我了。

二极管具有电流只流向单一方向的性质，叫做整流作用。

整流作用！

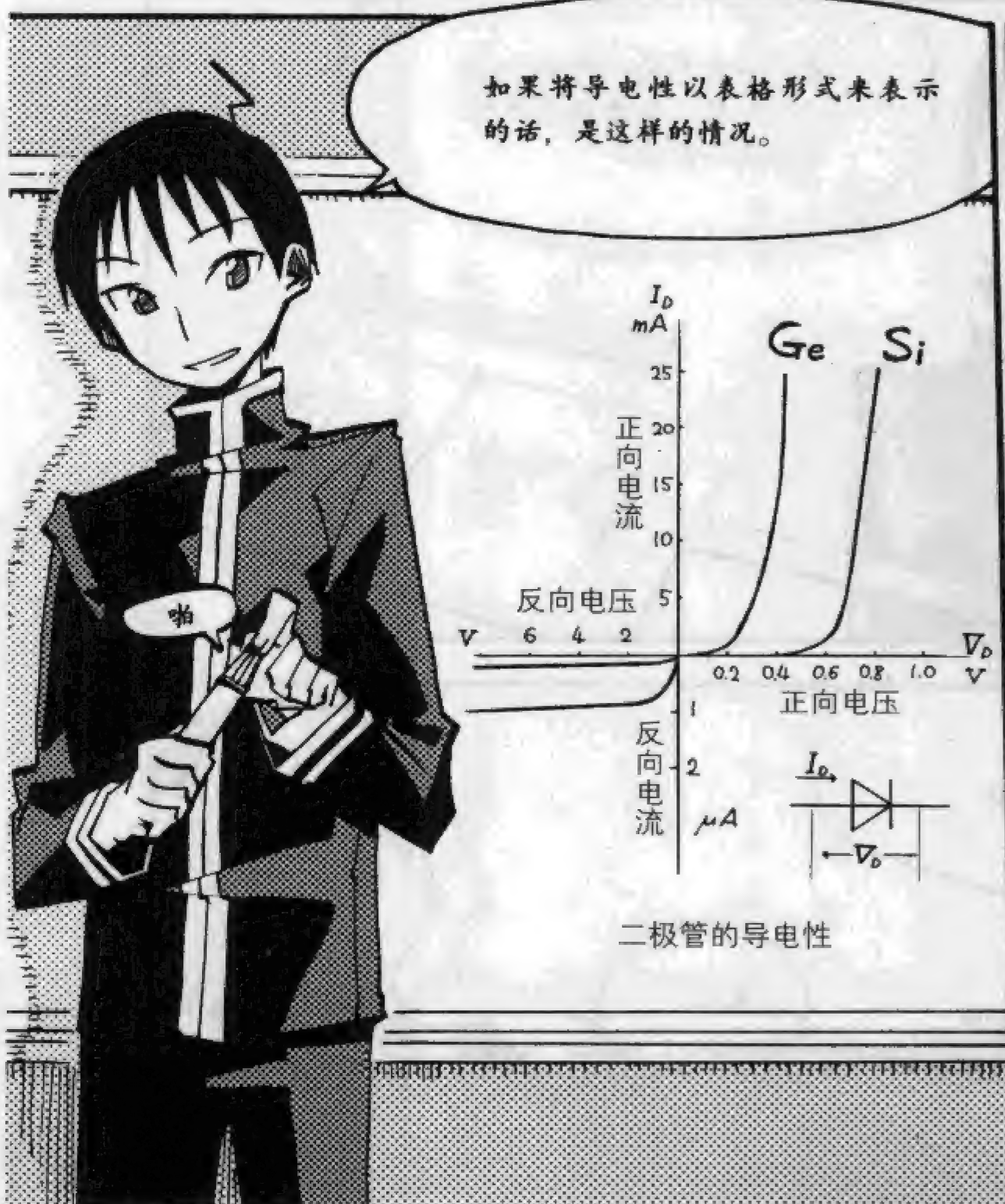
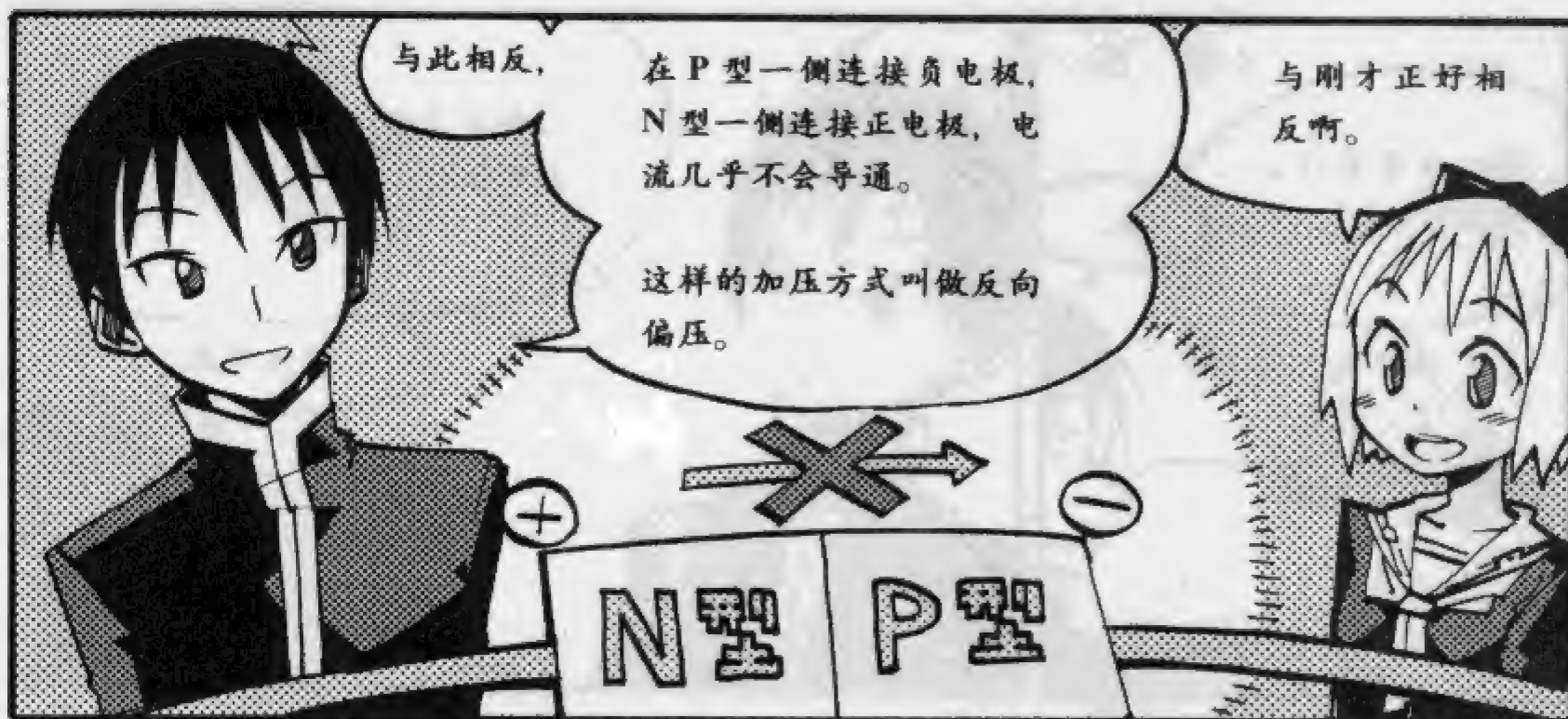
在二极管P型一侧连接正电极，N型一侧连接负电极，电流就会导通。

电 流

P型 N型

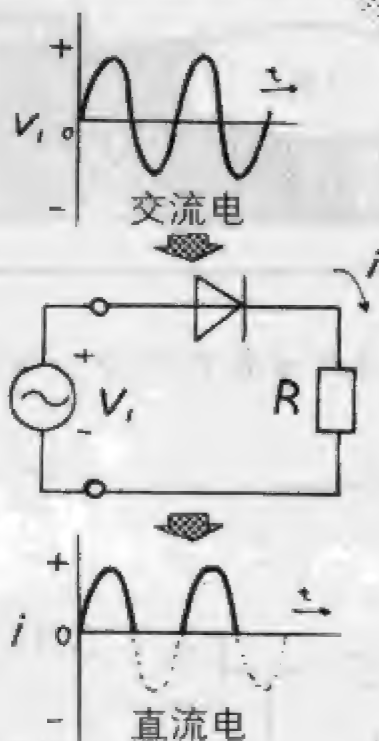
这样的加压方式叫做正向偏压。

是的。



<整流电路>

利用这种性质，可以制作出
电流只向一个方向流动的整
流电路。



就是将交流电转变
成直流电吧。

顺便说一下，

P型半导体与N型半导体中P与N的含义，你明白吗？

那是什么啊？

P 是 positive,

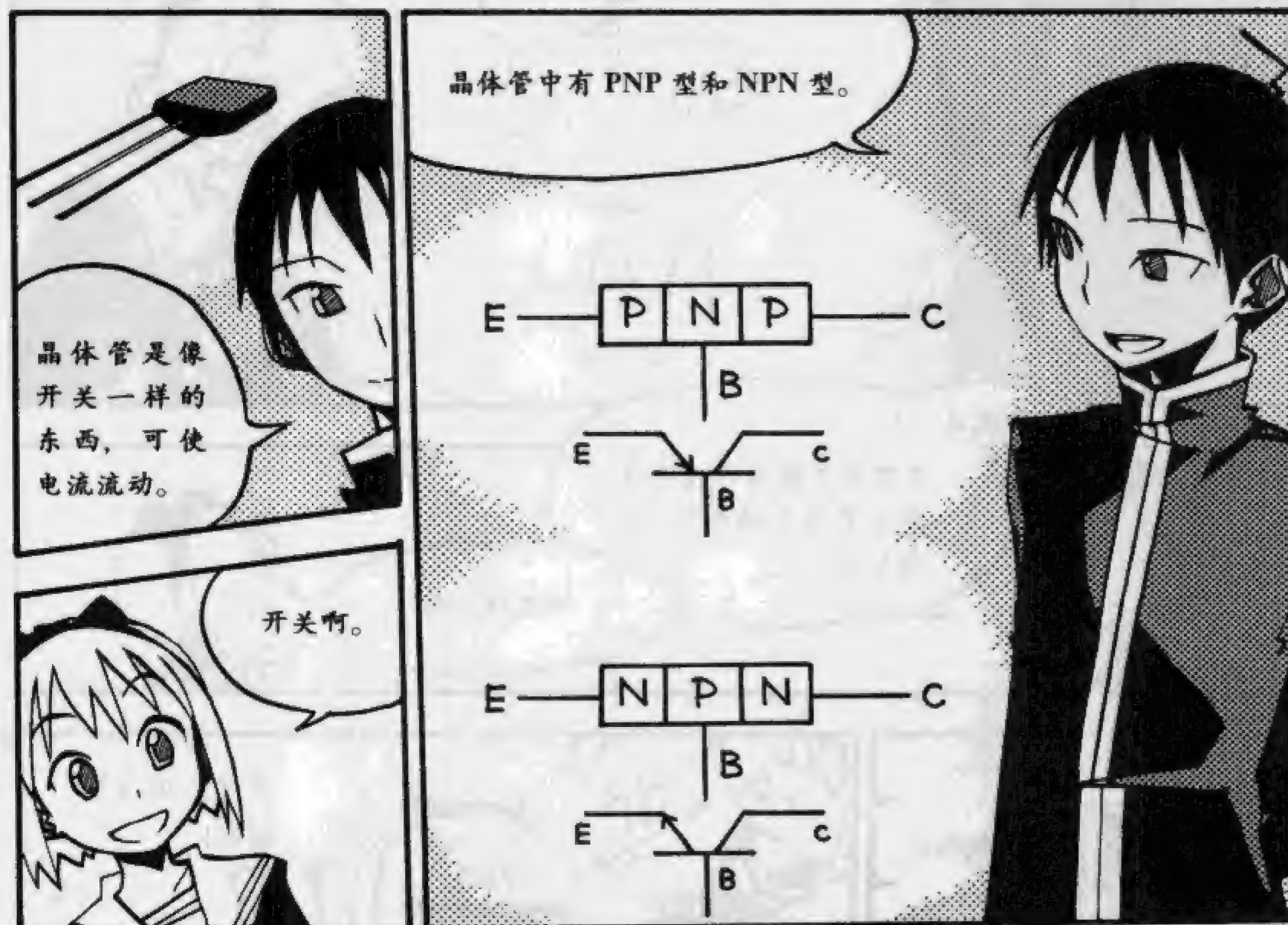
N 是 negative

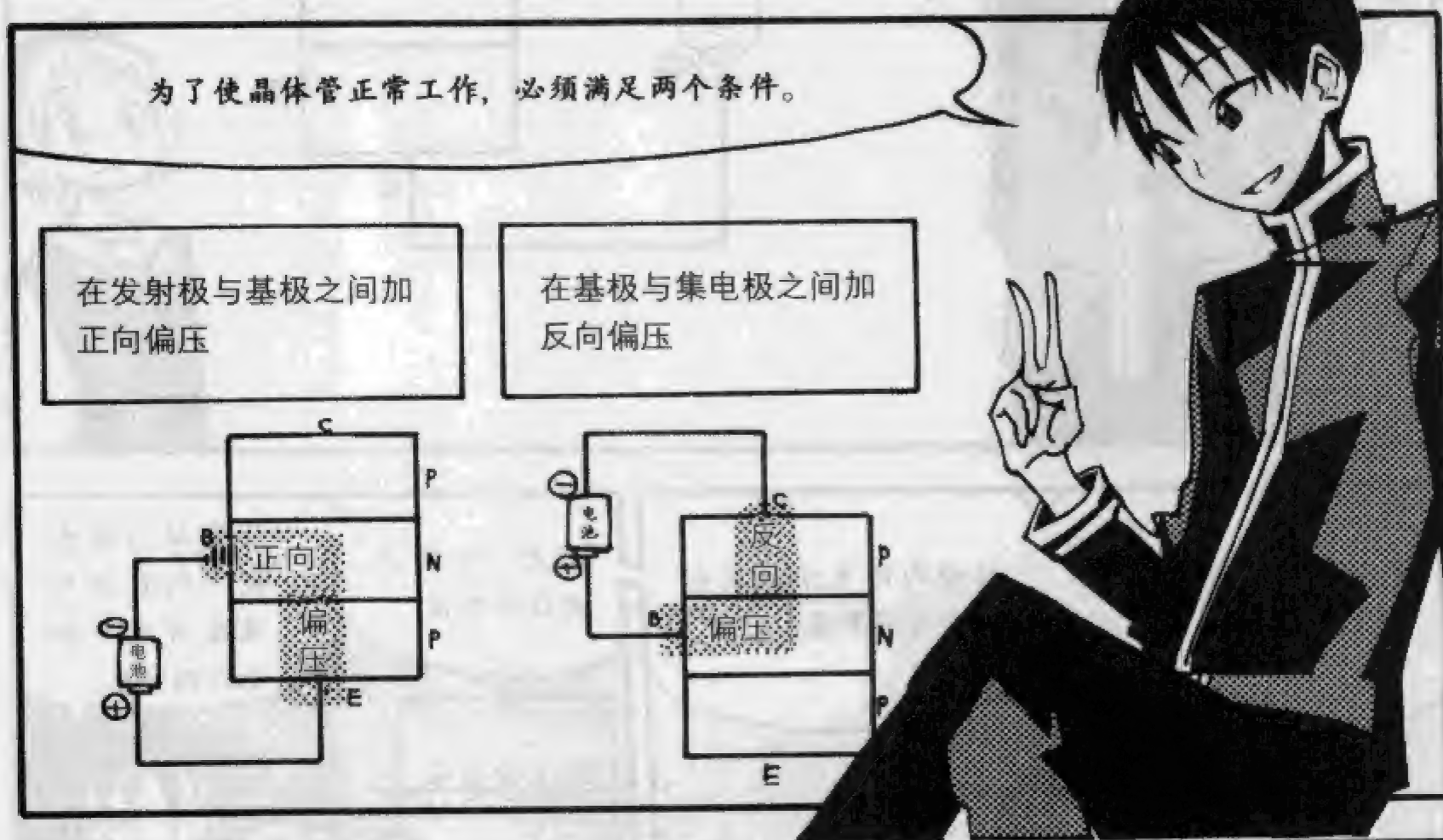
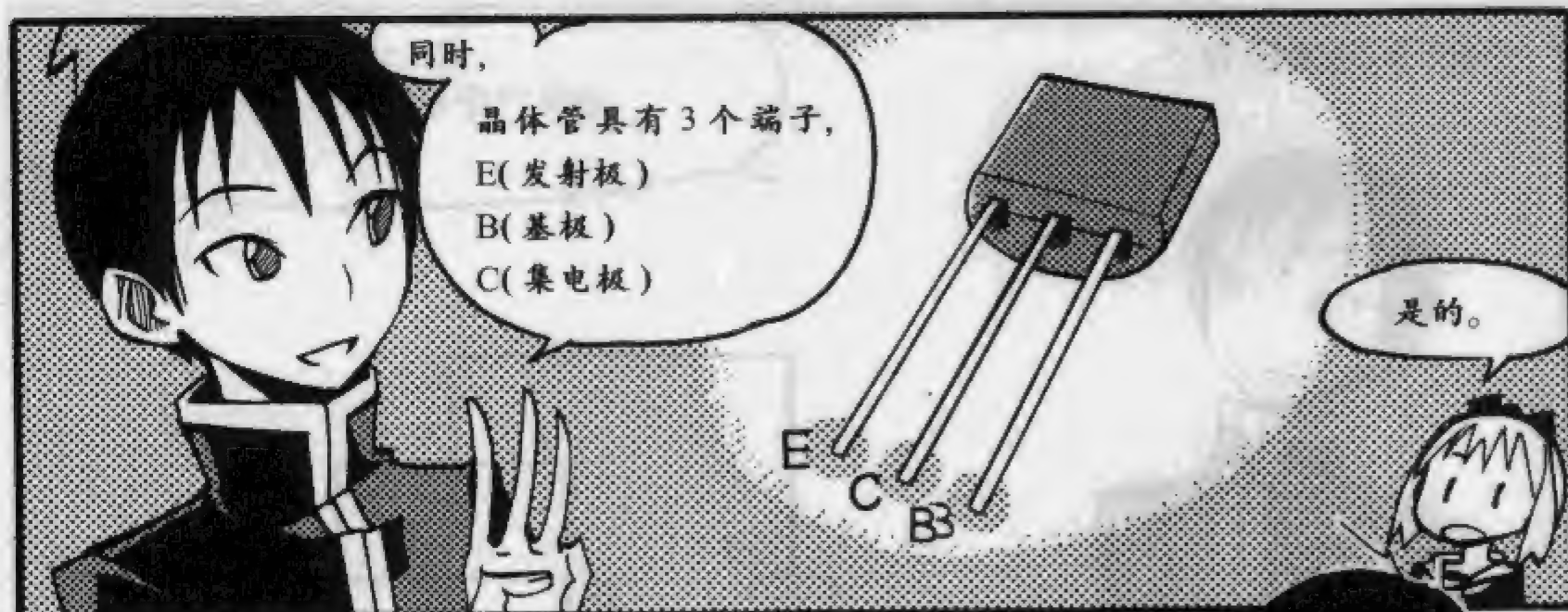
的意思。

就是正极与负
极吧！

好厉害！

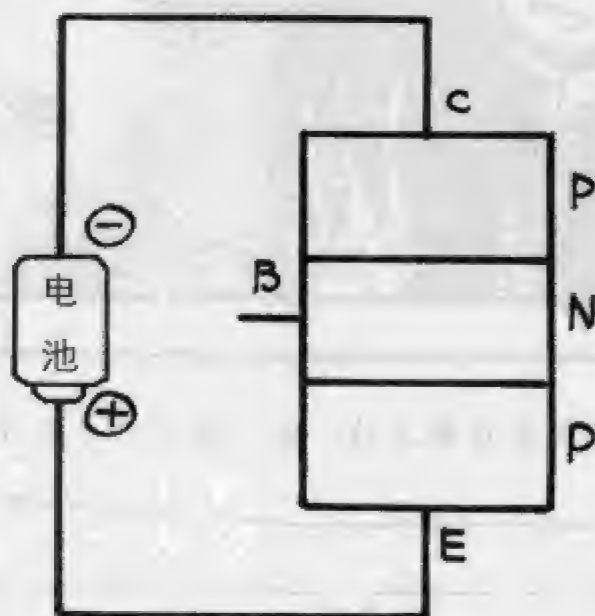
3. 双极晶体管





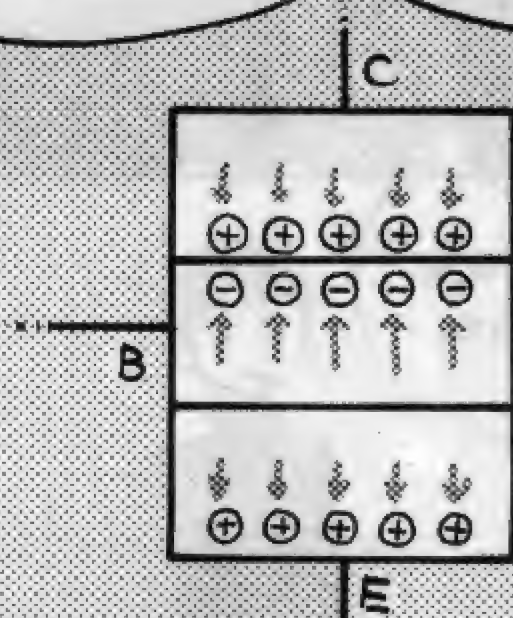
<PNP 型晶体极管>

连接 PNP 型晶体管看一看吧。



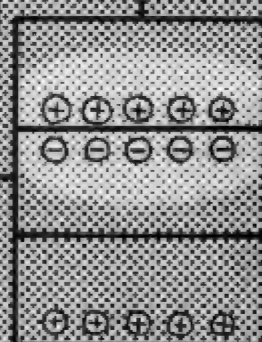
P 型内的电子被负电极引导而聚集，

N 型内的电子被正电极引导而聚集。



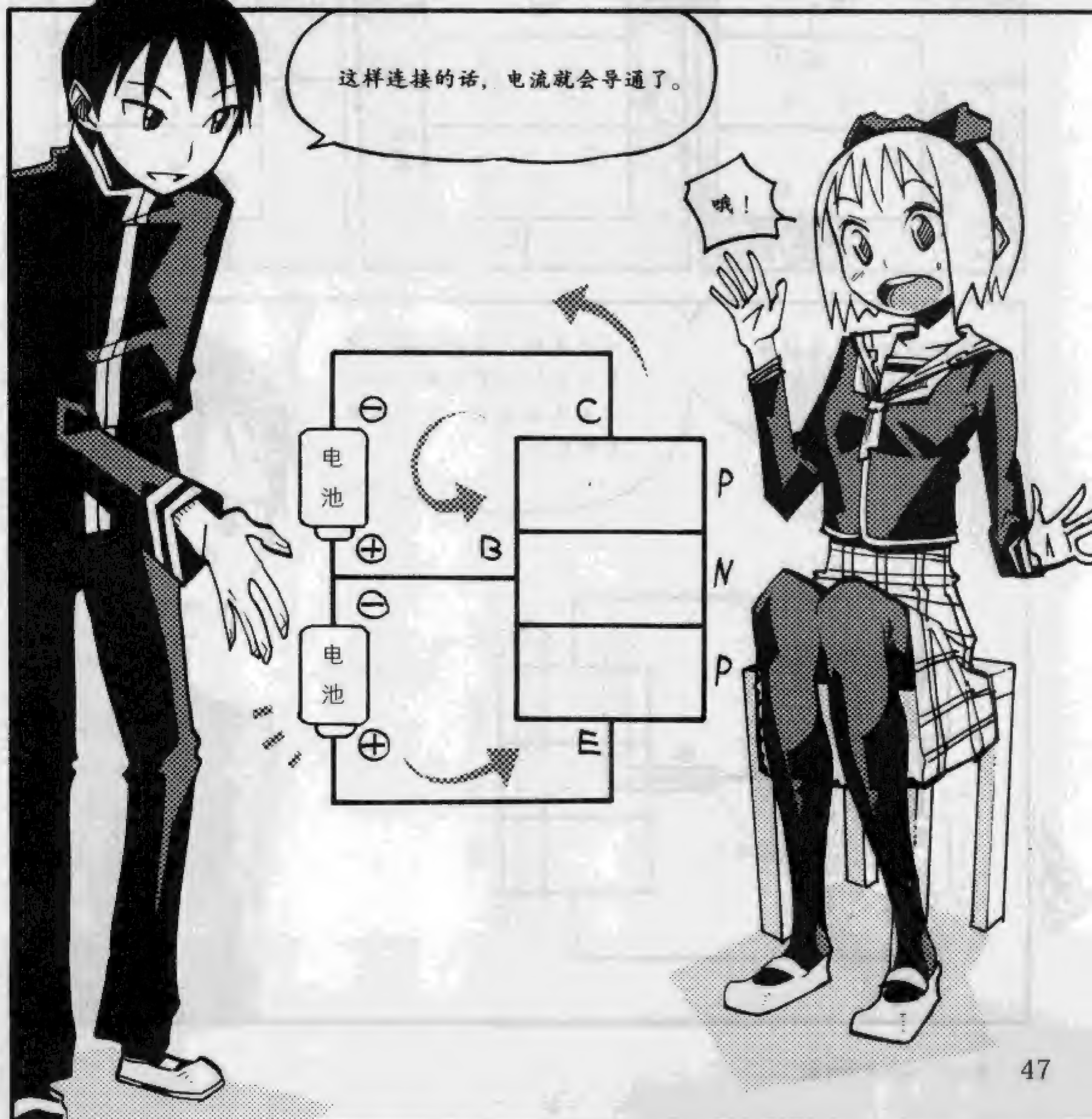
但是，如果只是这样的话，

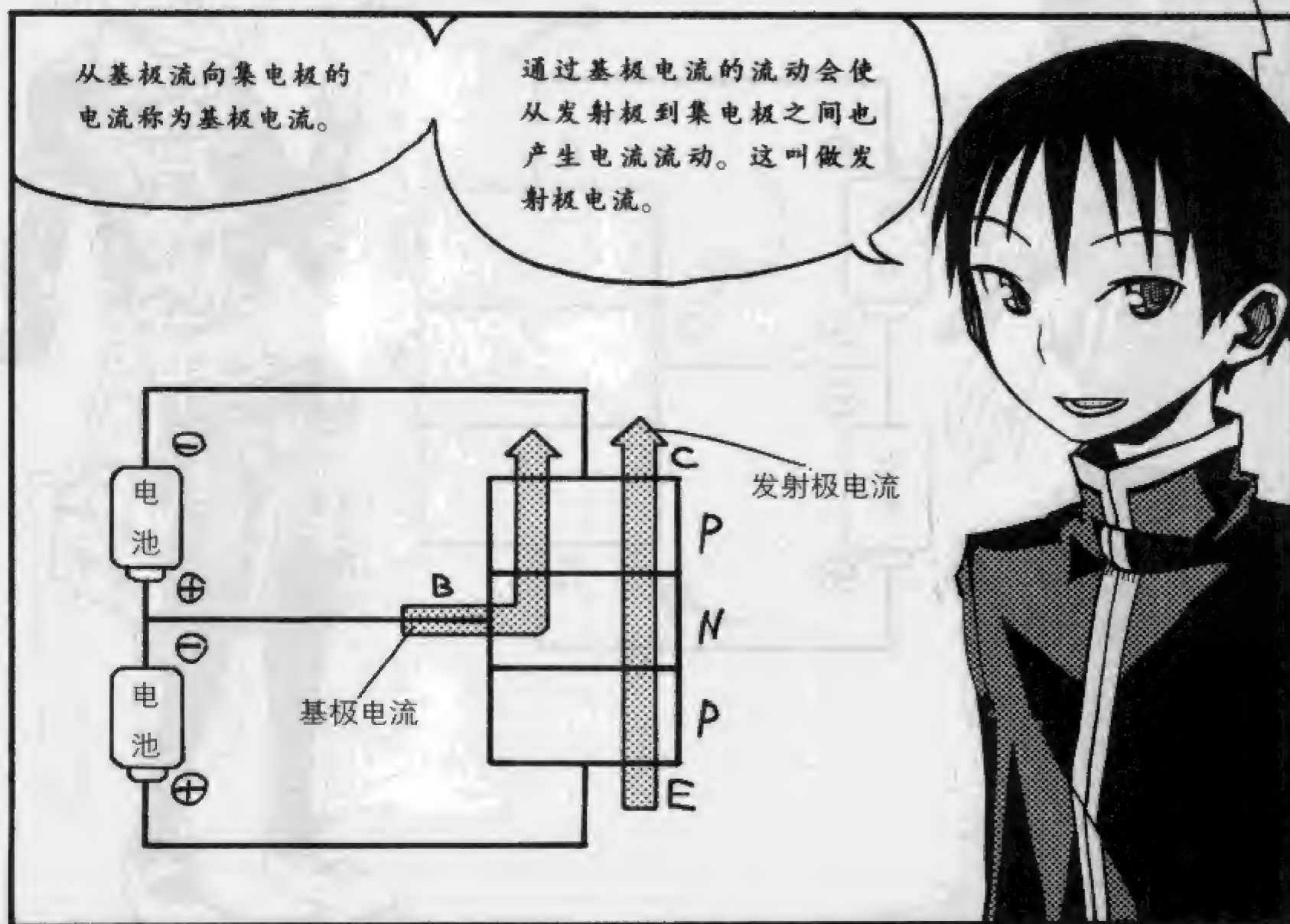
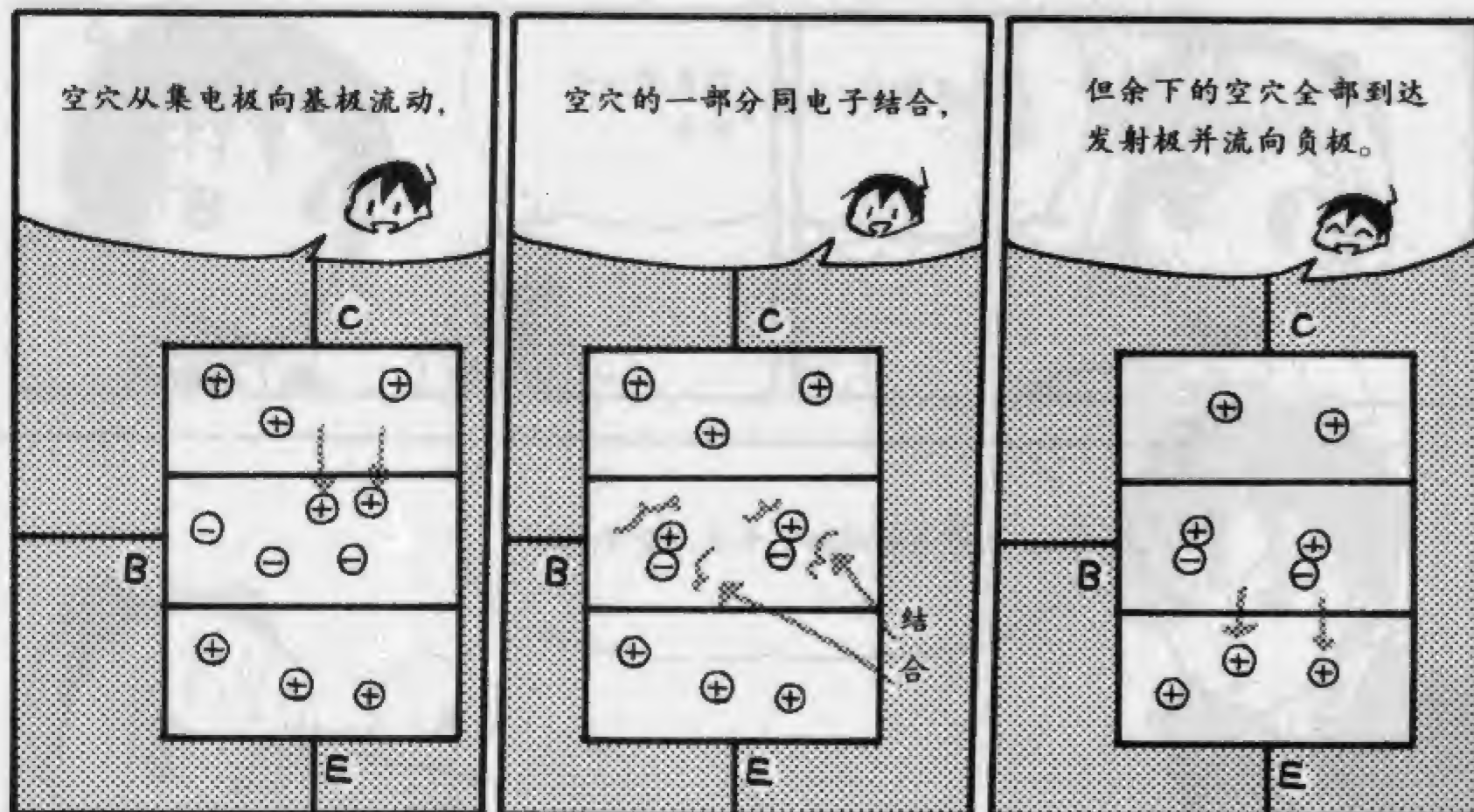
在基极与集电极之间就会形成没有电子和空穴的状态。

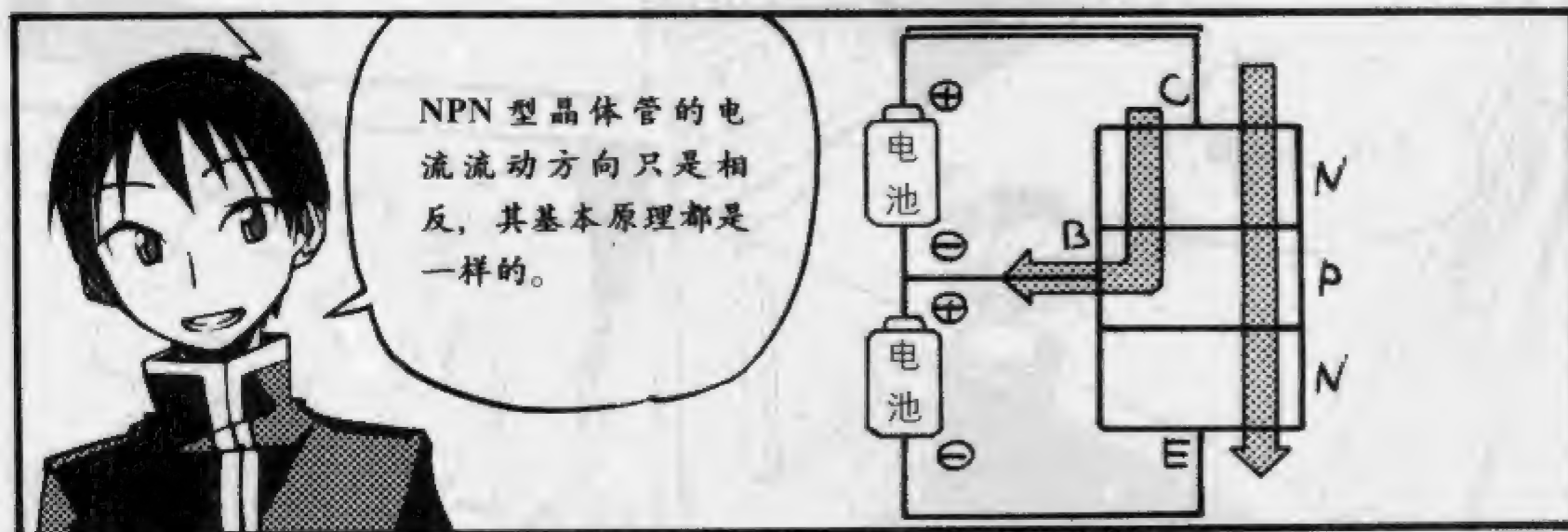


电流不会导通。

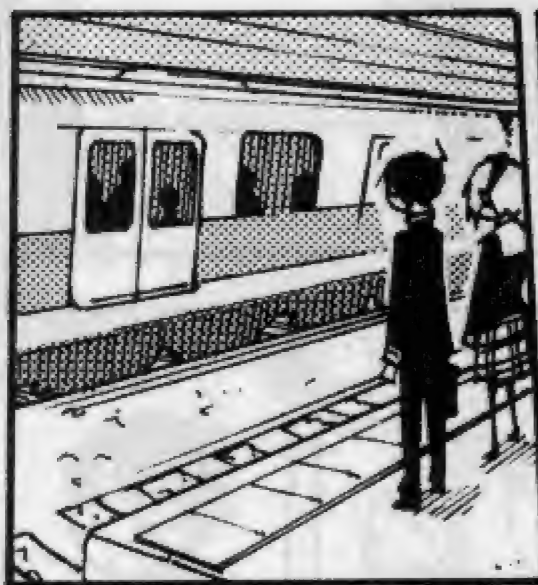
















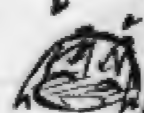
学长，

你是在担心
我吗？



啊，是啊！

你真体贴！



拜拜

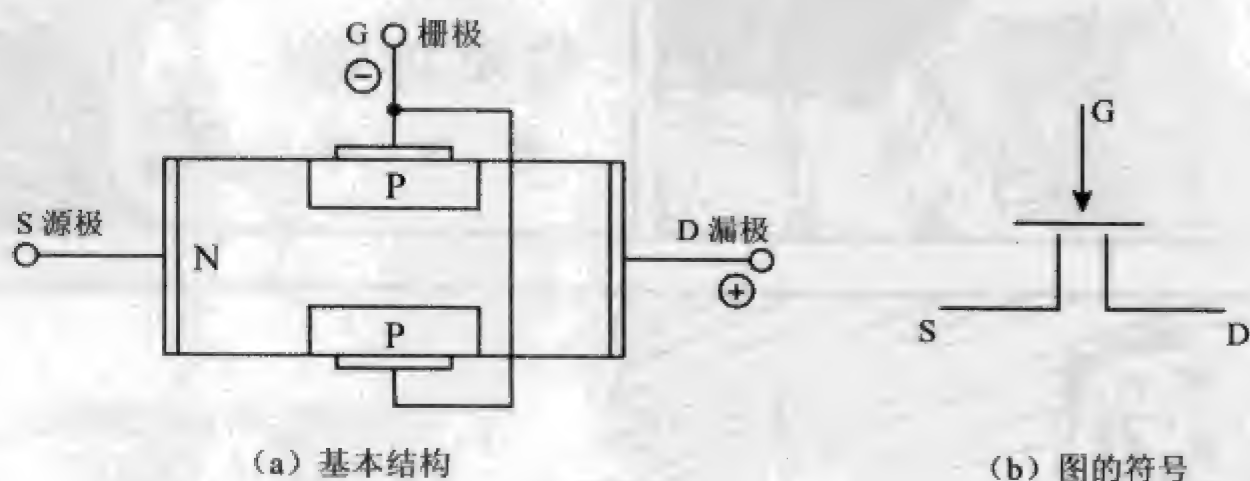
我不想让学长为我担心，
那我回家了，再见！

这个人，怎么回事……

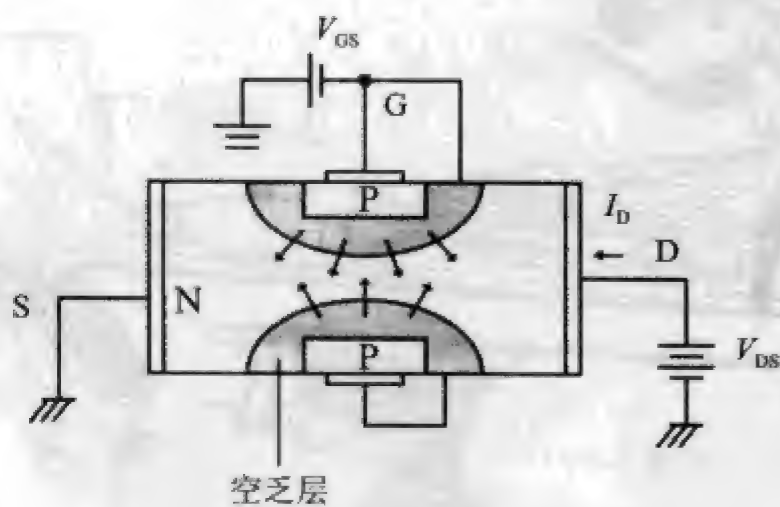
补充知识

J-FET 的结构与原理

所谓 J-FET 是指结型场效应晶体管 (Junction Field Effect Transistor)。其结构图如 2.A1 所示。这样, 从具有源极 (S) 和漏极 (D) 的 N 型半导体开始会形成一个薄层, 这个薄层叫做 N 沟道。同时, 将其连接两个 P 型半导体后结成电极, 这个电极称为栅极 (G)。



●图2.A1 J-FET的结构图



●图2.A2 J-FET的原理图

J-FET 的原理图如图 2. A2 所示。首先，在栅极与源极之间加反向偏压 V_{GS} （使之工作的直流电压）。通过此操作，栅极的 P 型半导体与 N 沟道之间形成空乏层。从漏极到源极流动的电流即漏极电流 I_D 会穿过 N 沟道的一部分。

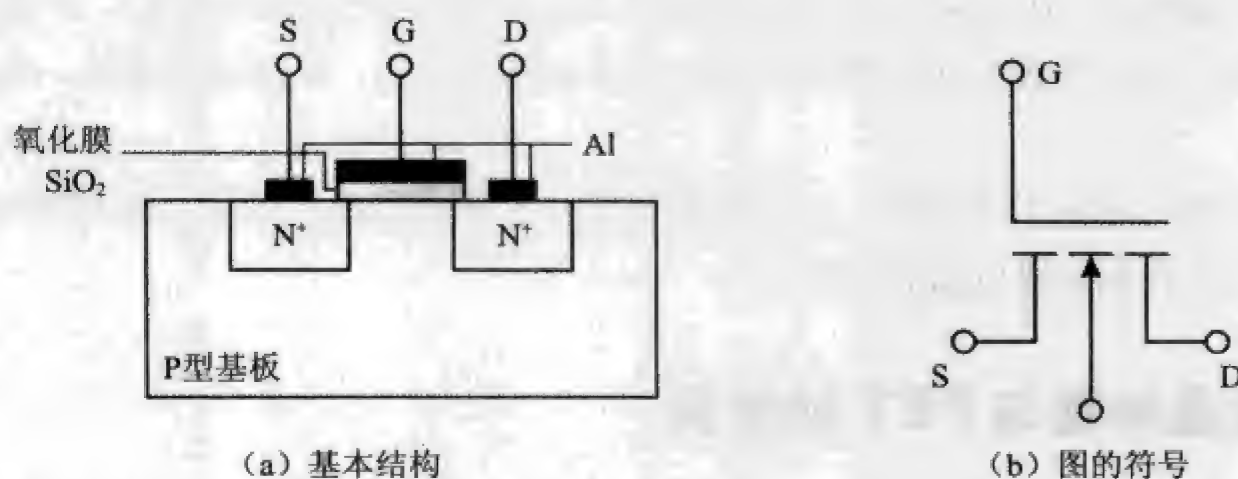
可是， V_{DS} 保持固定的情况下， V_{GS} 越大，空乏层则也会扩大。如果空乏层扩大到阻塞 N 沟道时，漏极电流 I_D 则不会流出。

如 $I_D=0$ 时， V_{GS} 叫做夹断电压， V_{GS} 则在夹断电压以下的大小范围内适用。

此 J-FET 具有电流几乎不会从栅极流出，并且可以通过栅极电压控制漏极电流的性质。

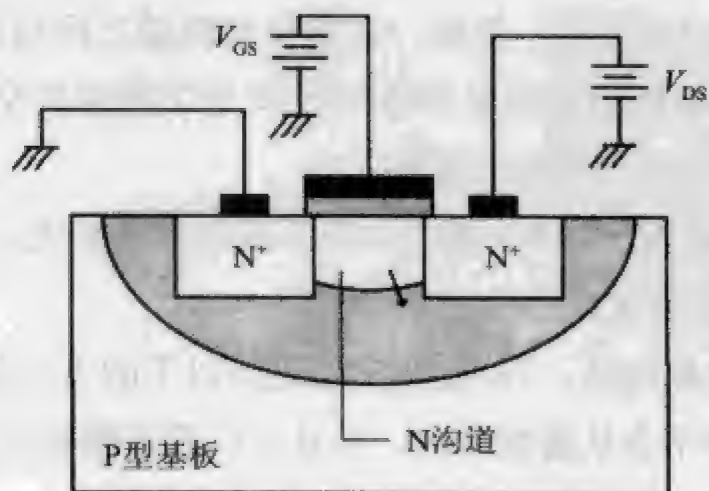
MOS-FET

所谓 MOS-FET 的 MOS 是指金属（Metal）、氧化物（Oxide）、半导体（Semiconductor）的略称。MOS-FET 由 3 个层次构成。其结构图如图 2.A3 所示。



● 图2.A3 MOS-FET的结构图

这样，有 P 型基板，在 N 型半导体中通过掺杂而构成源极和漏极，记为 N^+ 。同时，栅极则形成电极与 P 型基板之间夹着氧化膜（二氧化硅： SiO_2 ）的形状。



●图2.A4 MOS-FET的原理图

在这里，不向栅极加电压时，源极与漏极之间形成 N-P-N。这种情况下，给漏极加正偏压，给源极加负偏压时，也就是说，源极与漏极之间即使加电压电流也不会流动。但是，如果给栅极加正偏压时，通过 SiO_2 形成的氧化膜（显示了作为绝缘体的性质），P 型基板的一部分源极与漏极之间会形成 N 型半导体的薄层。这称为 N 沟道，N 沟道形成时，电流就会从漏极流向源极。

因为栅极的一部分有绝缘膜，所以栅极电流几乎不会流动。因此，这 MOS-FET 形成通过栅极电压可以控制漏极电流的结构。

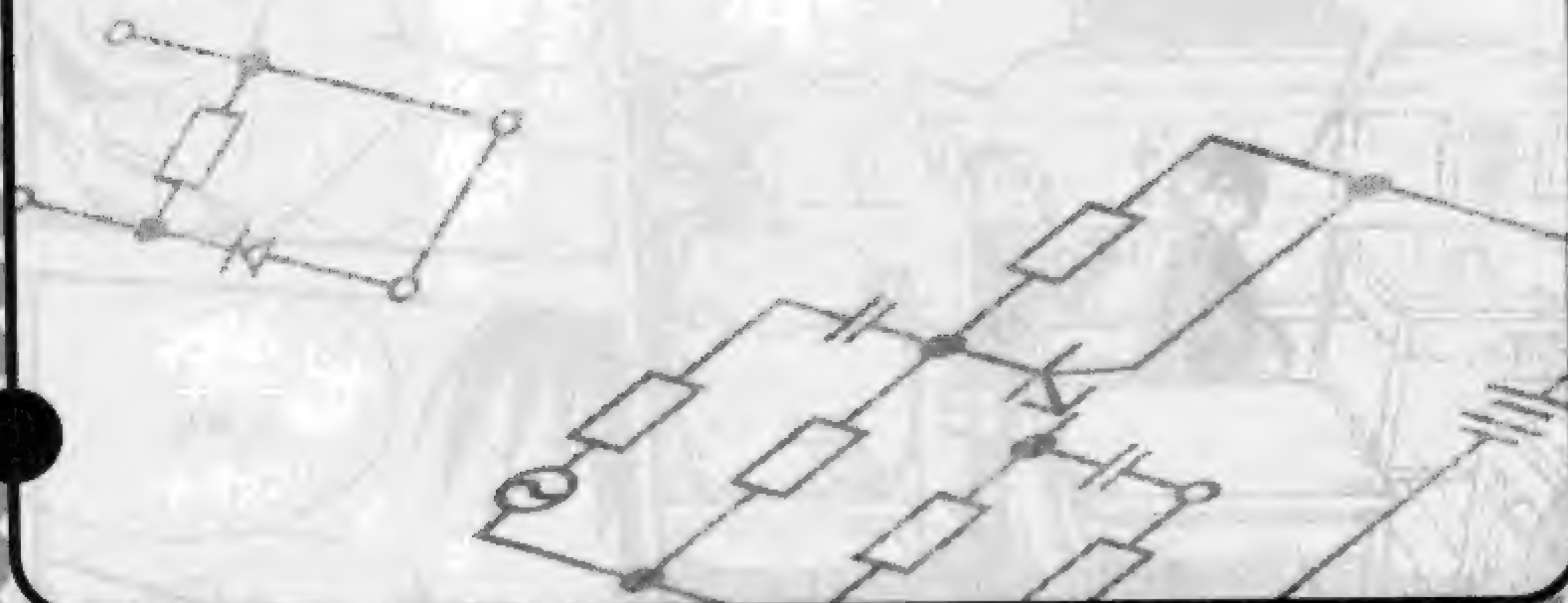
双极晶体管与 FET 的差异

双极晶体管其动作的主体有两个，即电子和空穴，因为动作主体有两个所以叫做双极管。但是，FET 的情况时，无论是 J-FET 还是 MOS-FET，动作的主体领域是单一的，所以叫做单极晶体管。

同时，两者的电流控制方法也不同，双极晶体管是用基极电流控制发射极电流的，而单极晶体管是用栅极电压控制漏极电流的。

第3章

电气电路的知识











1. 基尔霍夫定律



< 基尔霍夫的第1定律和第2定律 >

基尔霍夫的第1定律是这样的定律。

流入1个接点的电力总和是0。

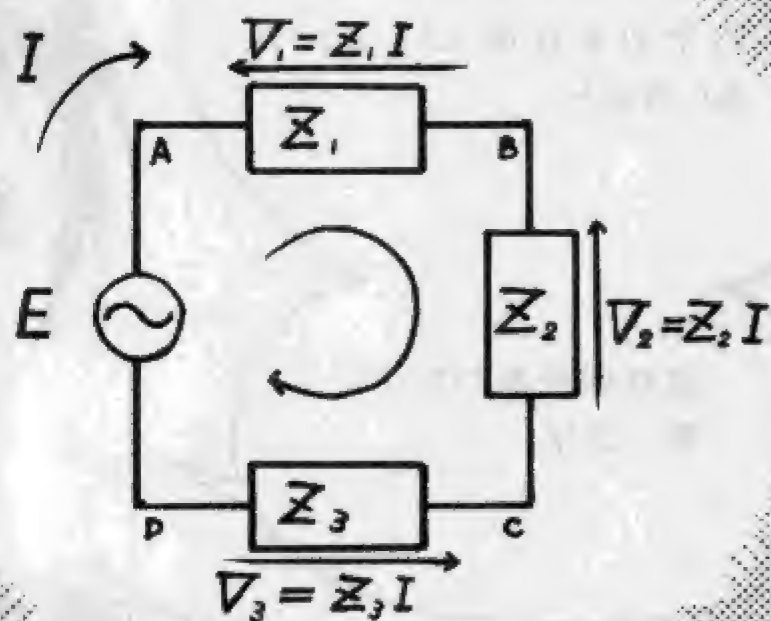
流入中心点的电流 I_1 和 I_2 的总和等于流出电流 I_3 的总和



它也被称为
电流守恒定律。



接下来是这个图。



这个图表示了基尔霍夫的第2定律。

这里意味着电流驱动电压 E 等于负荷 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 中的电压降 Z_1I 、 Z_2I 、 Z_3I 的总和。

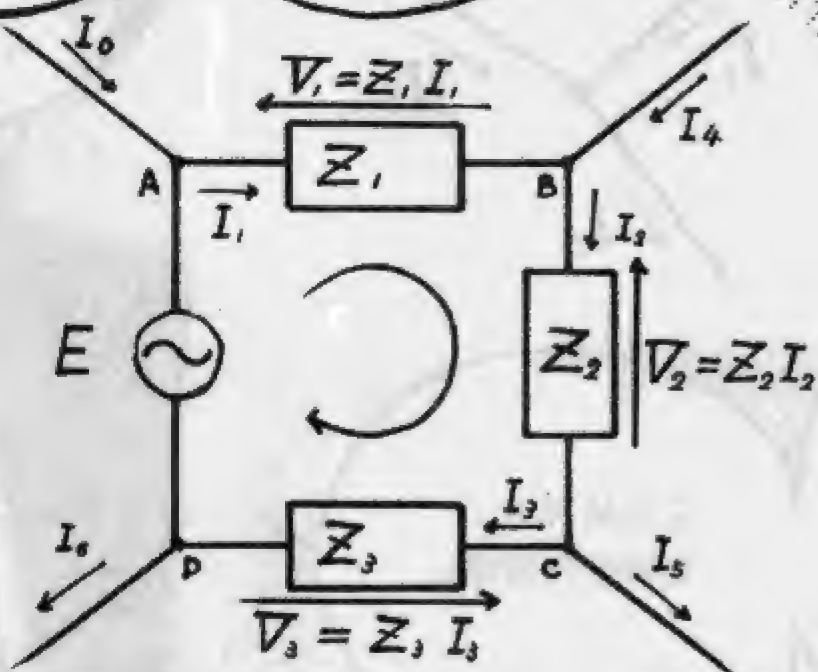
为了不把 Z 与 2 弄错，书写时写为 \mathcal{Z} 。

这是什么呀？



将这个考虑为一般表示接点有分支的情况。

这个图同刚才的图的差异是什么呢？



接点 ABCD 带有分支， I 的地方不同。

嗯，正确！

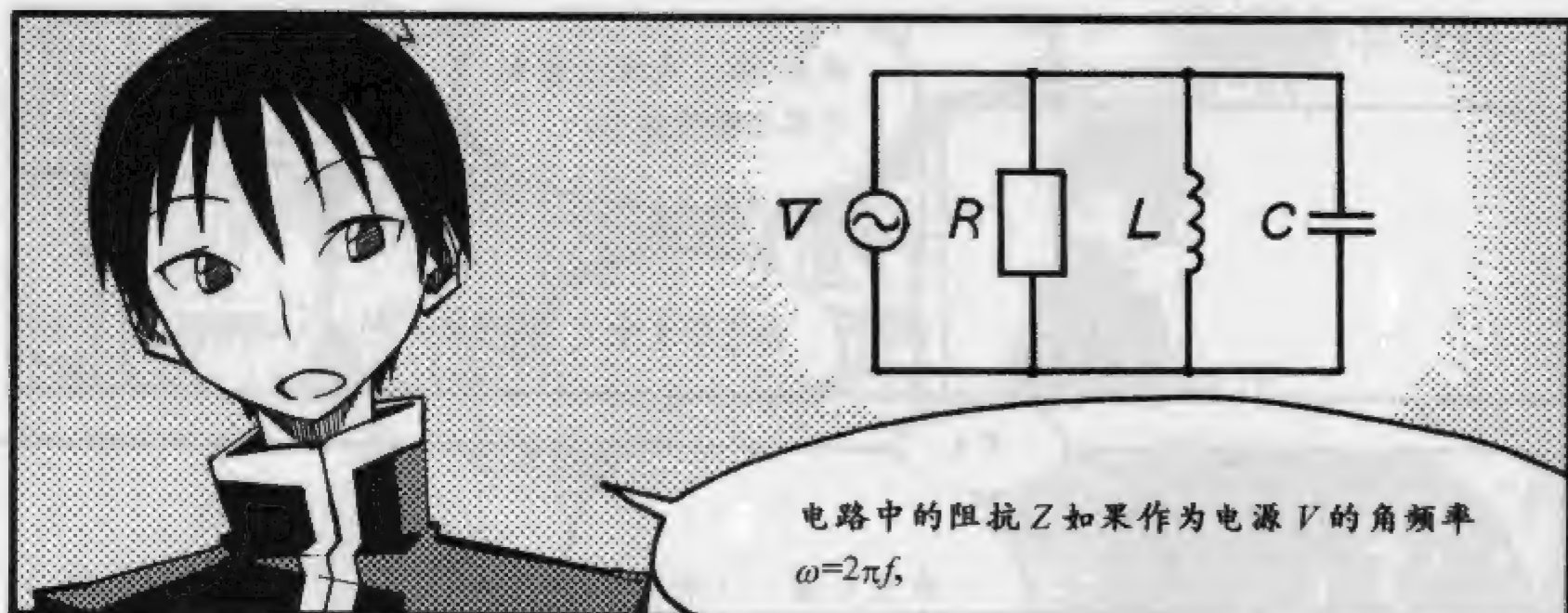
这时，意味着电流驱动电压 E 等于负荷 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 中的电压降 $Z_1 I_1$ 、 $Z_2 I_2$ 、 $Z_3 I_3$ 的总和。

这就叫做基尔霍夫的第 2 定律。



2. RLC 并联电路

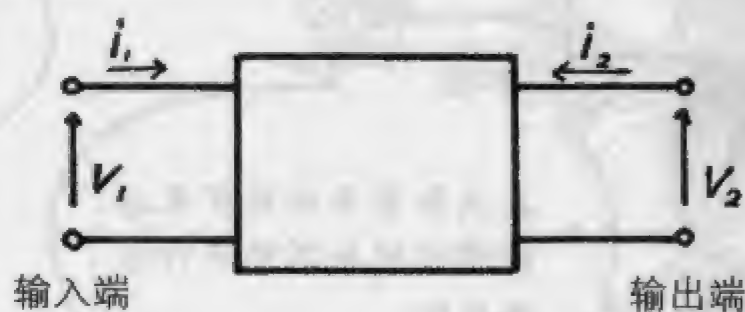




3. h 参数等效电路



首先来看一下 h 参数吧。



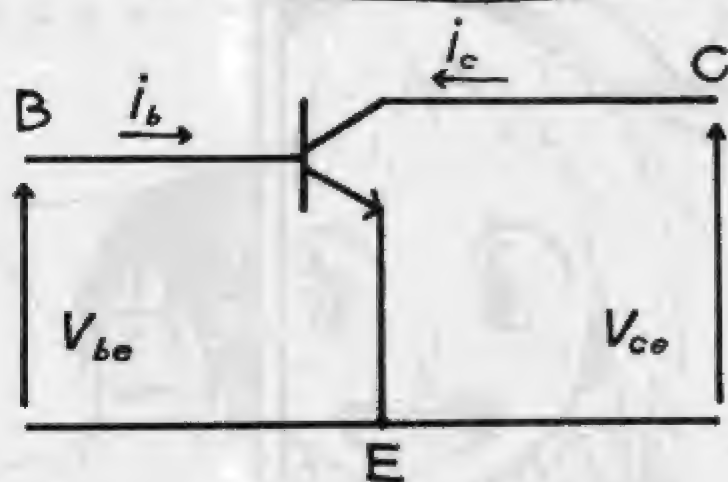
左侧为输入，
右侧为输出

箭头的方向就是电压
或电流的方向。

$$\begin{pmatrix} v_1 \\ i_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_i & h_r \\ h_f & h_o \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_1 \\ v_2 \end{pmatrix}$$

用计算公式来表
示的话就是这样的。

这样按照这个公式而电路化的产物就是
h 参数等效电路。



发射极接地的晶体管

这个公式的4个h都是什么含义啊？

$$\begin{pmatrix} v_1 \\ i_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_i & h_r \\ h_f & h_o \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_1 \\ v_2 \end{pmatrix}$$

你问得很好！

公式中的h各自是这样的含义。

啊？

h_i — 输入阻抗

从输入一侧来看的电阻成分

h_r — 反向电压增益

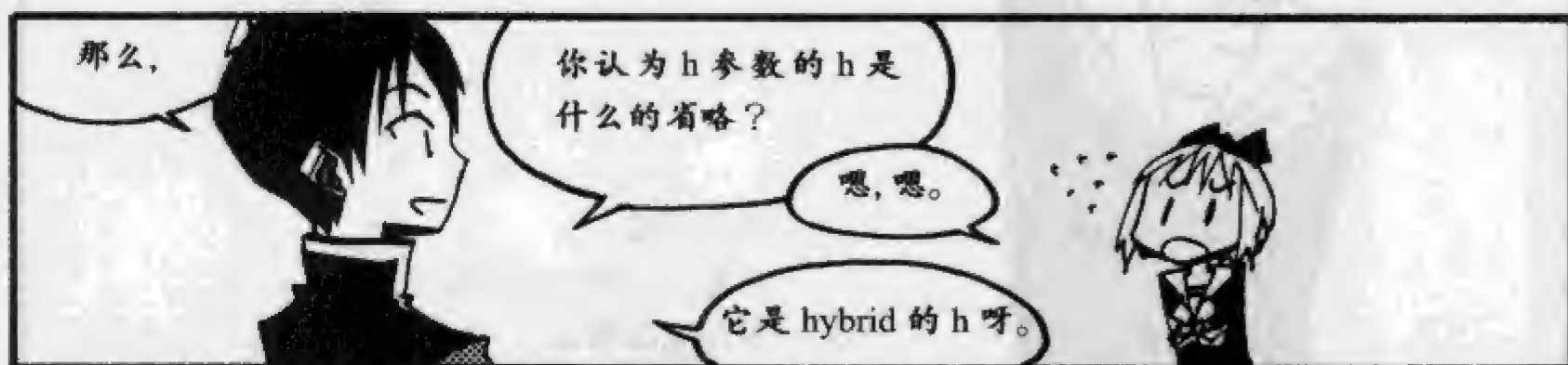
数字表示输入电压是输出电压的几倍

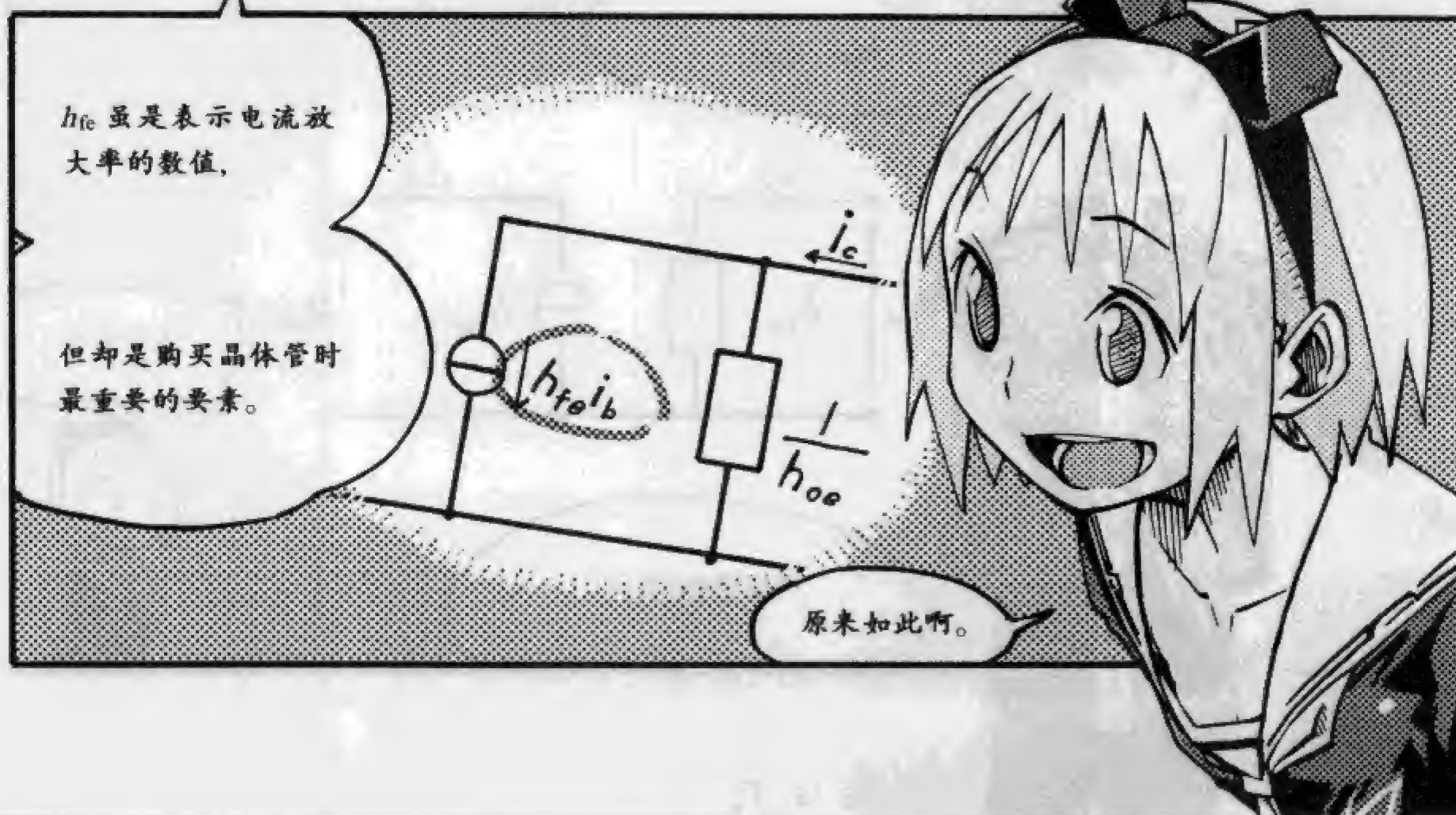
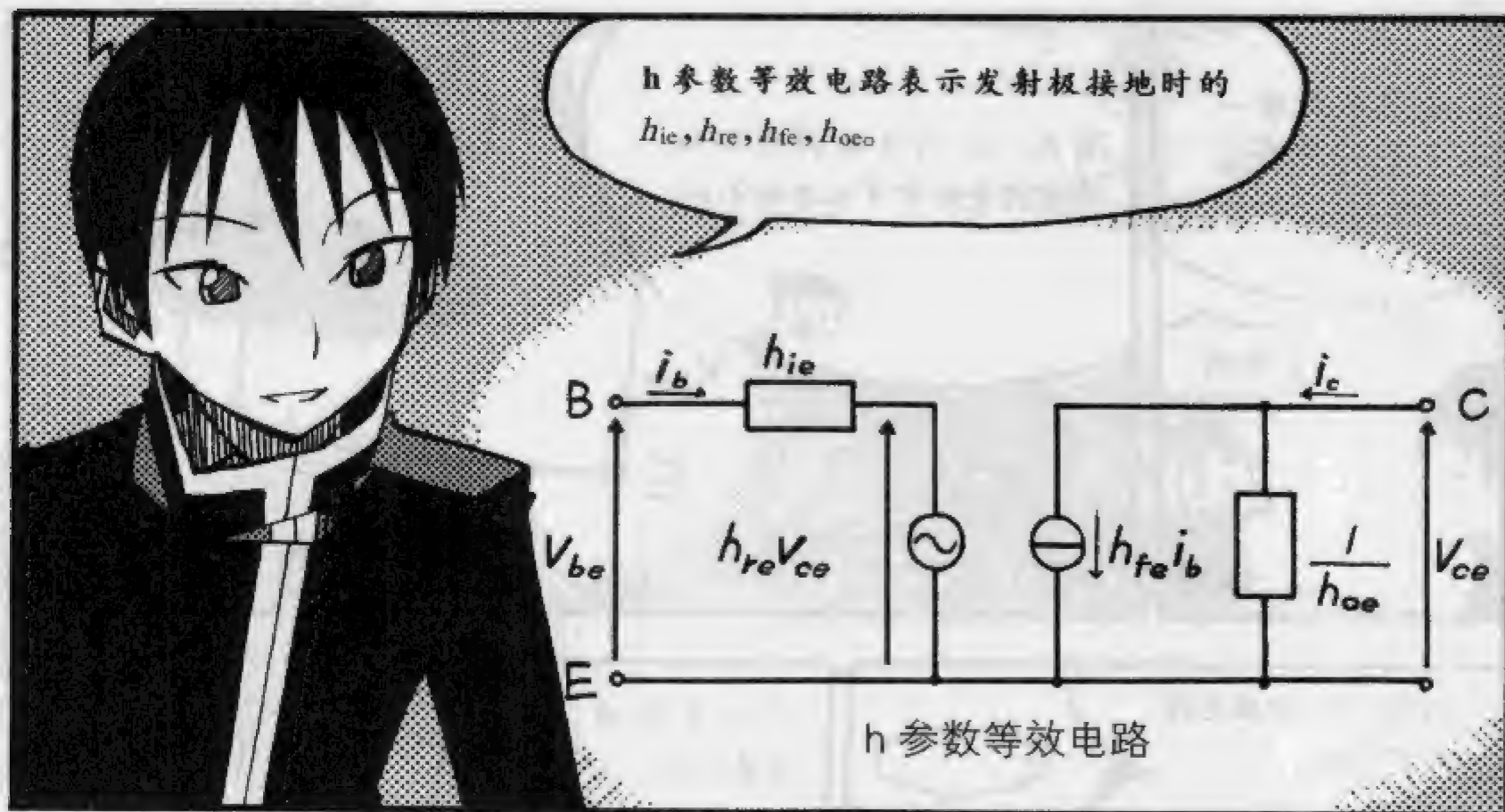
h_f — 电流增益

数字表示输出电流是输入电流的几倍

h_o — 输出导纳

从输出一侧来看的电阻成分的倒数

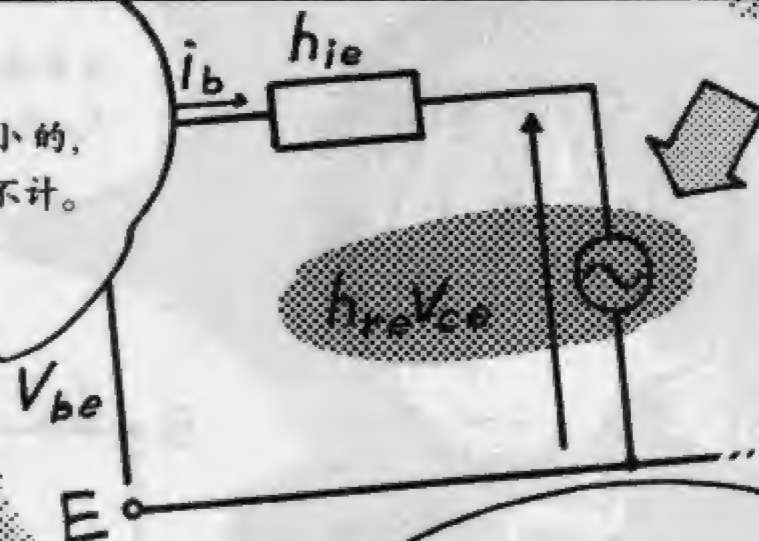




我们也来看一下 h_{fe} 以外的几个吧。

好的。

首先, h_{fe} 的值是特别小的, 在进行分析中可以忽略不计。

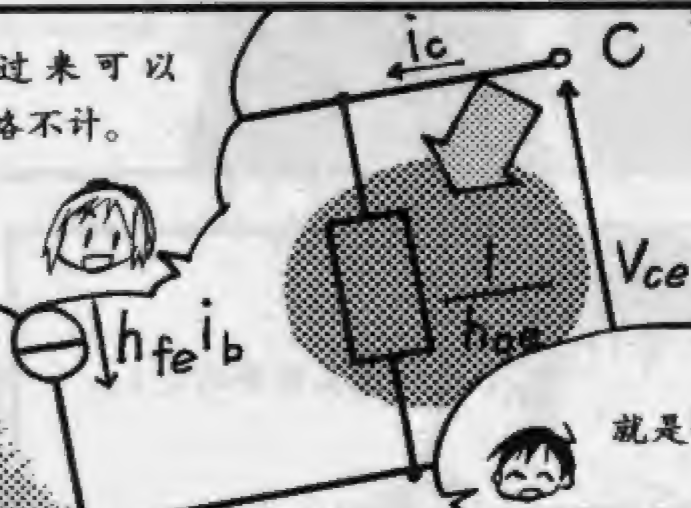


是吗?

同时, h_{oe} 的值也是非常小的。

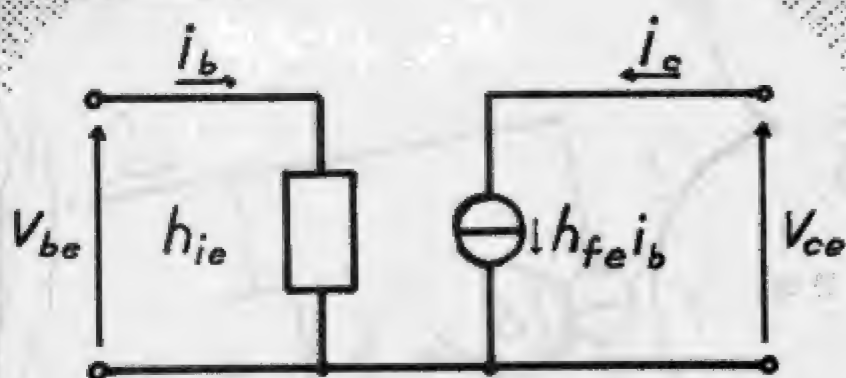
于是, $1/h_{oe}$ 则可看作特别大。

反过来可以忽略不计。



就是如此。

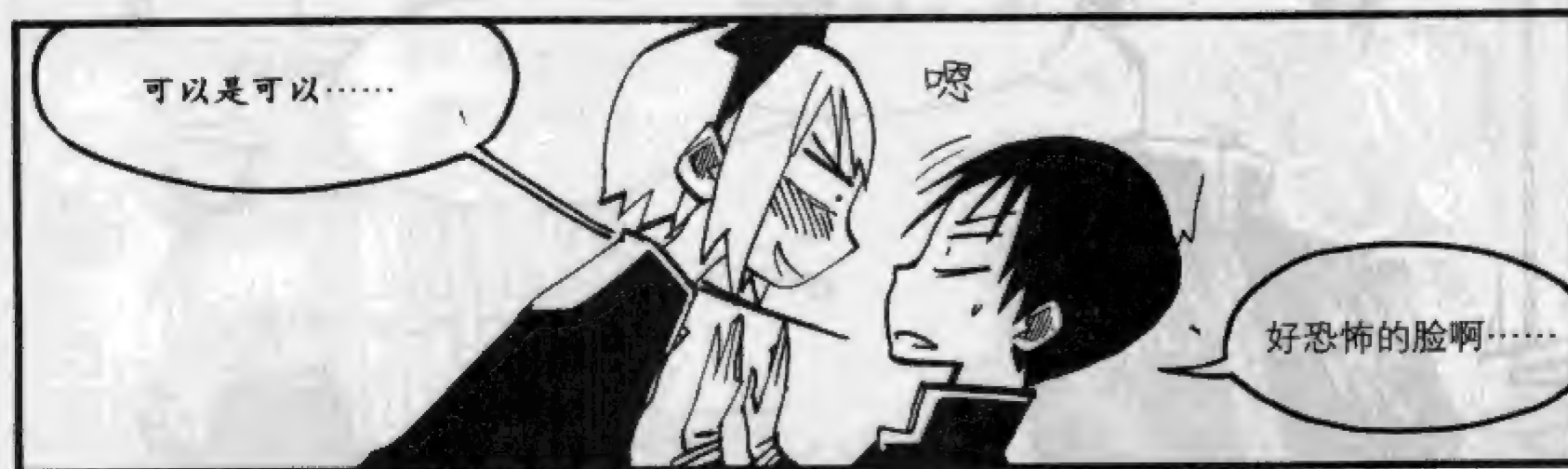
因此, 这样,



我明白了。

可以将图简化。





补充知识

电压源与电流源

电源有产生一定电压的电压源和产生一定电流的电流源两种。图 3.A1 中表示的是一般性使用的电源符号，左侧为直流的电压源、右侧为交流电压源。一般来说，因为电压源与电流源存在内阻，所以并不能提取出很多的电力。



直流电源



交流电源(电压源)

●图3.A1 一般性使用的电源符号

图 3.A2 表示的是理想电源。如果是理想电压源， $v=0$ 时可以将其看作是短路；如果 $v \neq 0$ 时，与负载的大小无关，可以提取一定的电压。如果是理想电流源， $i=0$ 时可以将其看作是开放状态；如果 $i \neq 0$ 时，与负载的大小无关，可以提取一定的电压。但是，理想电源是不能进行等效互换的。换言之，电压源与电流源之间不能进行互换。只有存在内阻才能进行这样的互换。



理想电压源



理想电流源

●图3.A2 理想电源

电压放大率

电压放大率可以用输入电压与输出电压之比来表示。这个数值比 1 大时可以说电压被放大了。与此相反，这个数值比 1 小时则电压在衰减。

$$A_v = \frac{v_{out}}{v_{in}}$$

$$A_v = 20 \lg \left| \frac{v_{out}}{v_{in}} \right| (\text{dB})$$

这样，电压放大率有两种书写方式。上面的书写方式是表示一般性的比率，也可以表示相位。下面的书写方式是以分贝（dB）为单位来表示的，电子电路的情况时，原来也可用于进行信号处理等。用分贝表示时，如果电压被放大了，得到的是正值，可以说如果增加 20（dB）电压放大率则变为 10 倍，但却不能知道相位。

➤ 电流放大率

电流放大率的值可以用输入电流与输出电流之比得到。

$$A_i = \frac{i_{out}}{i_{in}}$$

$$A_i = 20 \lg \left| \frac{i_{out}}{i_{in}} \right| (\text{dB})$$

这也有两种书写方式。

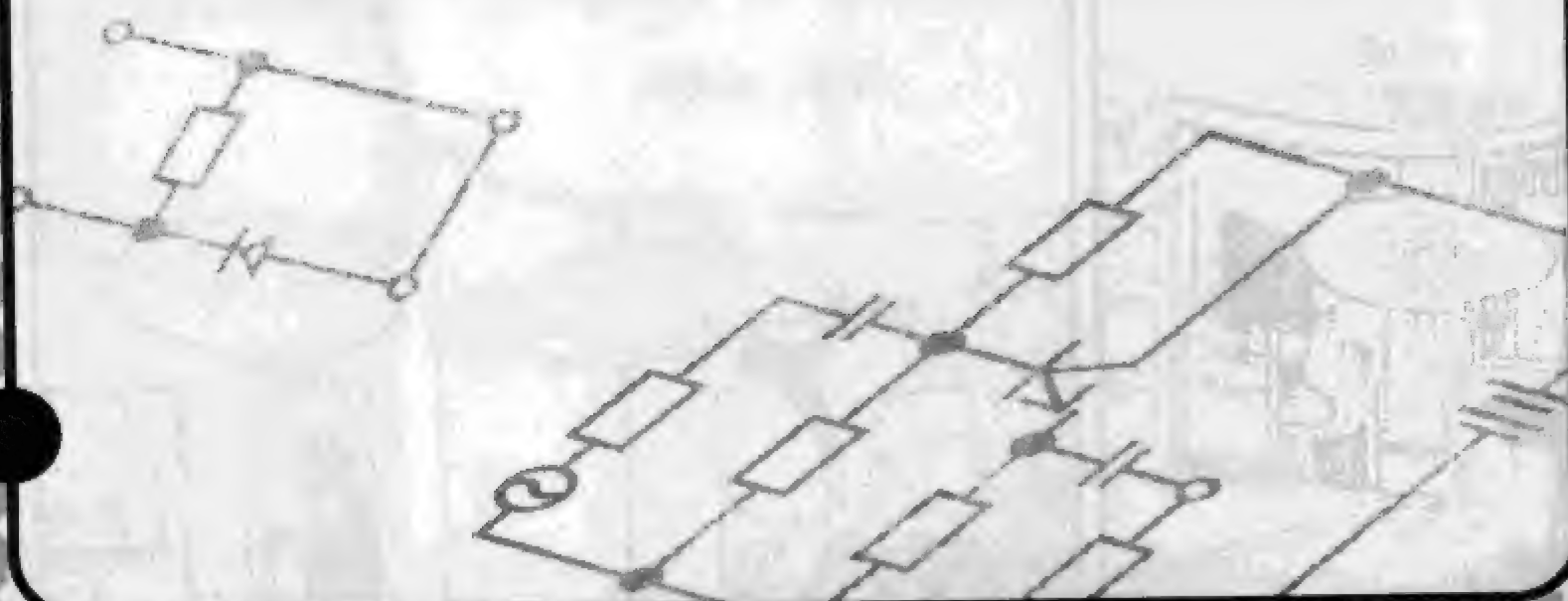
考察电流放大率的频率特性时，频率为 $\frac{i_{out}}{i_{in}} = \frac{1}{\sqrt{2}}$ 则称为断路频率。这时的电流放大率大概为 -3dB。

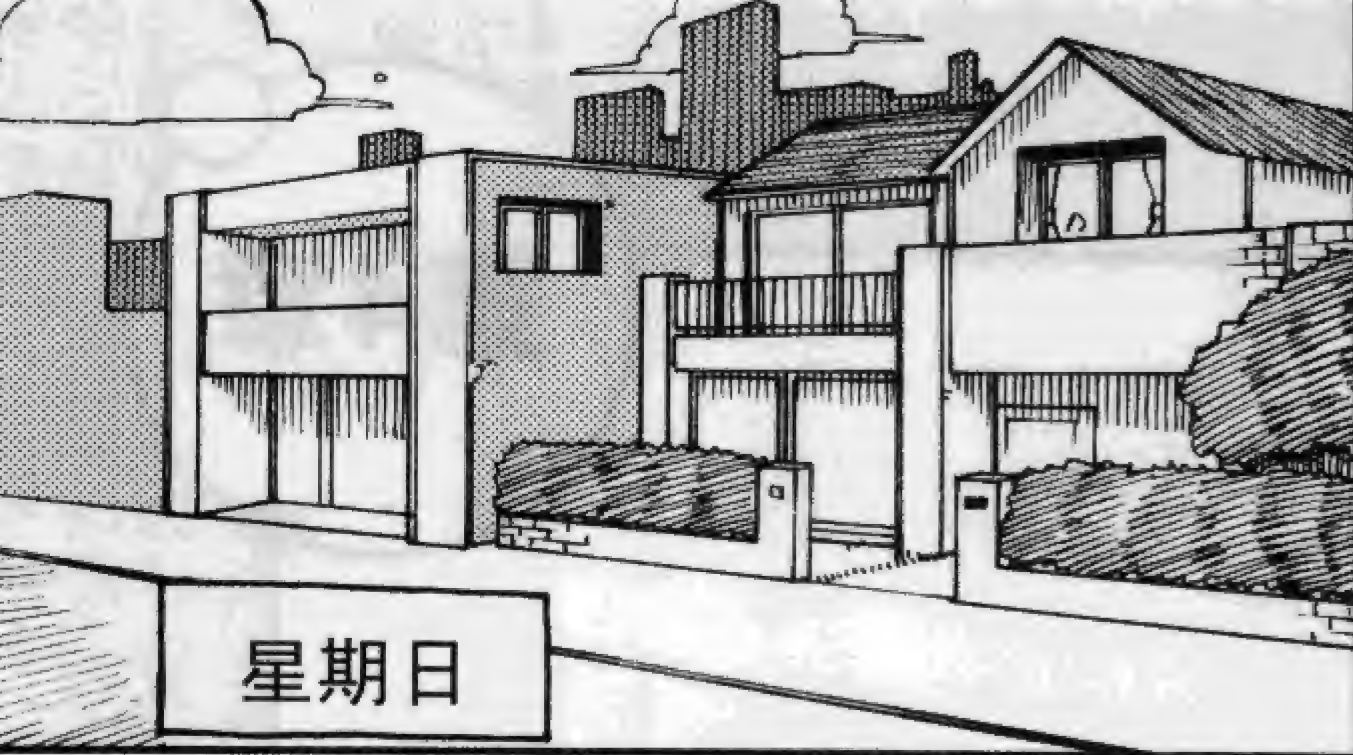
➤ 关于虚数 i 与 j

使用复数时，在数学领域里一般书写为 $\sqrt{-1} = i$ ，但在电气和电子等领域里写为 $\sqrt{-1} = j$ 。其理由在于，i 是用于表示电流的变量，为了不使两者混淆。本书也是关于电子电路的内容，所以也以 $\sqrt{-1} = j$ 来表示。

第4章

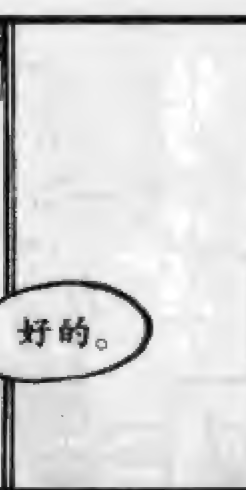
调谐放大电路





星期日

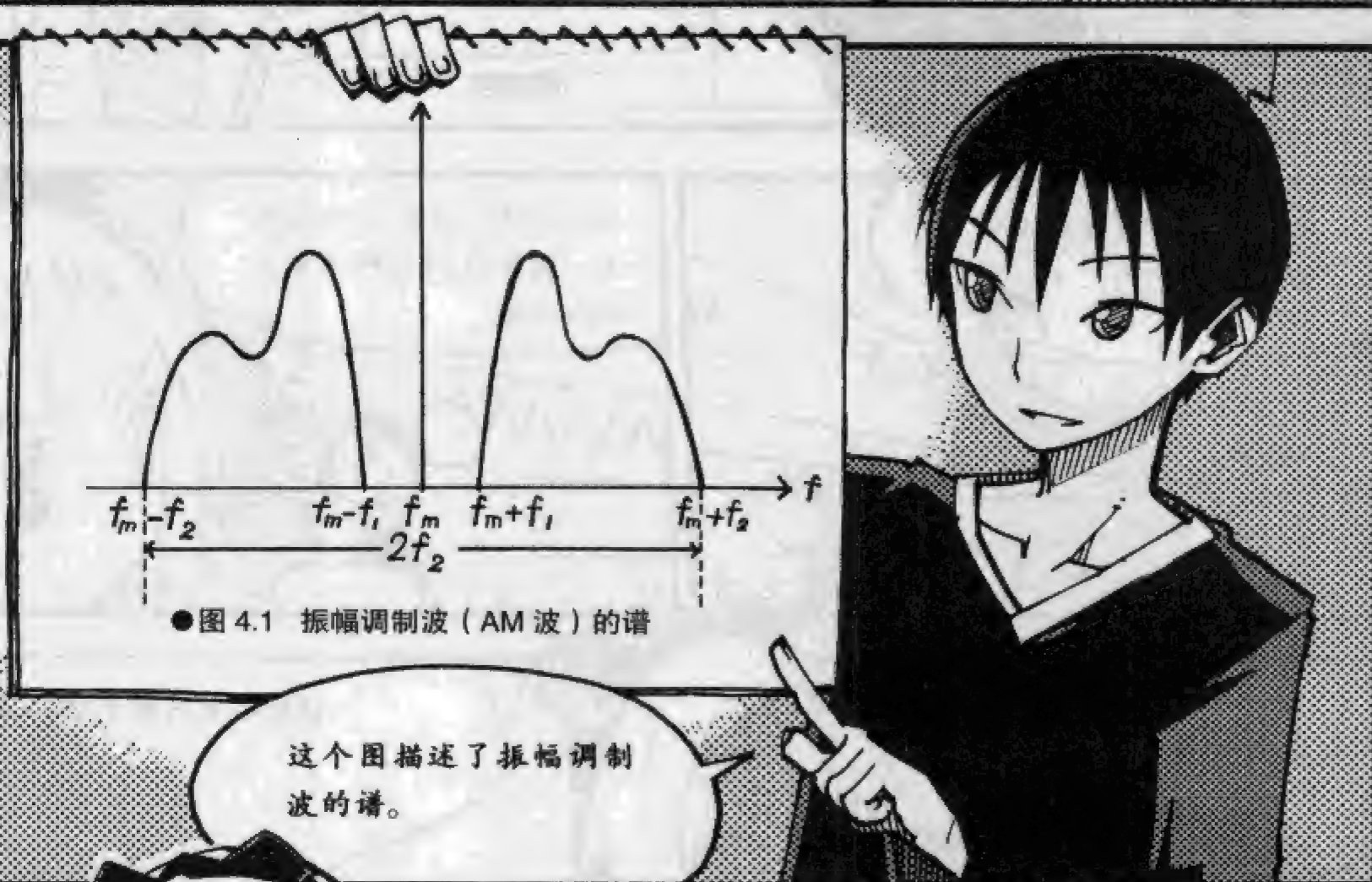




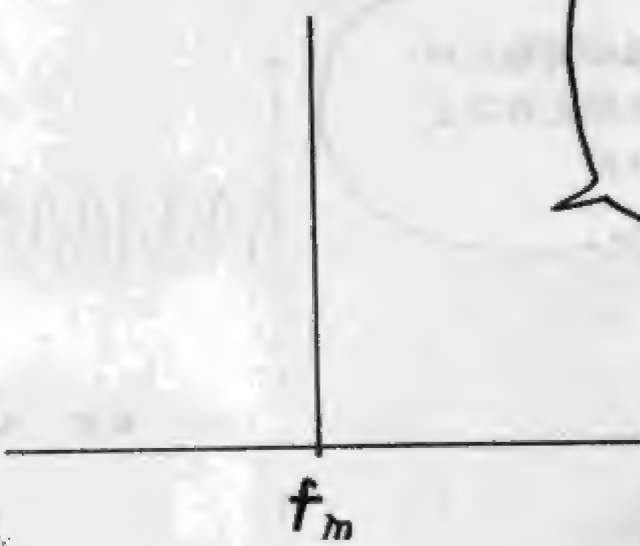


1. 调谐放大电路的原理





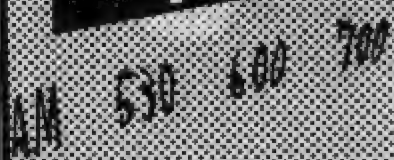
<何为振幅调制波>



所谓振幅调制波是指在AM收音机中使用的波。

以输送频率 f_m 为中心，并添加了音谱。

所谓输送频率是指选择广播站时必需的频率。



例如，

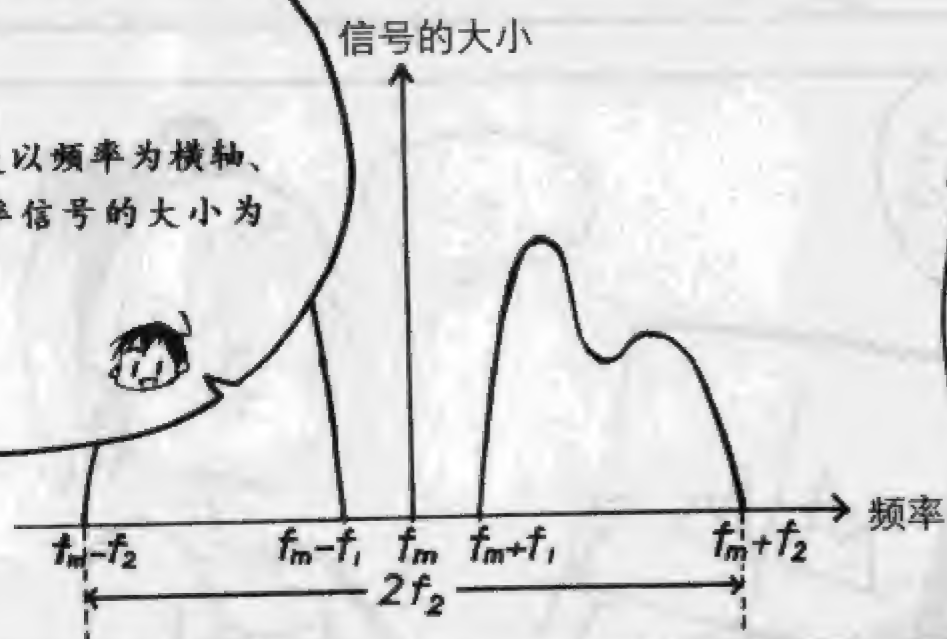
NHK 广播第1频道就是AM594kHz。



是啊。

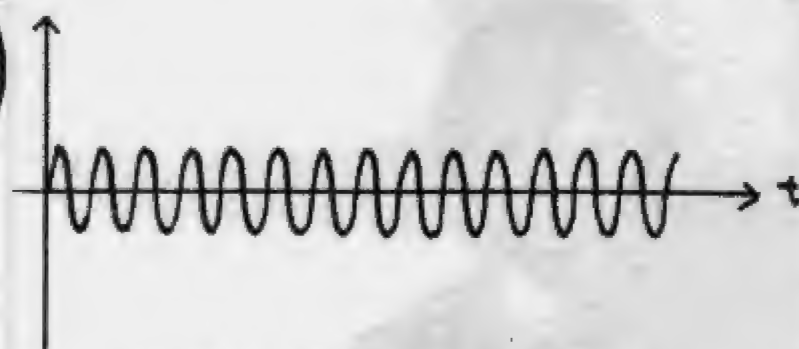
同时，

所谓谱是以频率为横轴、以其频率信号的大小为纵轴。

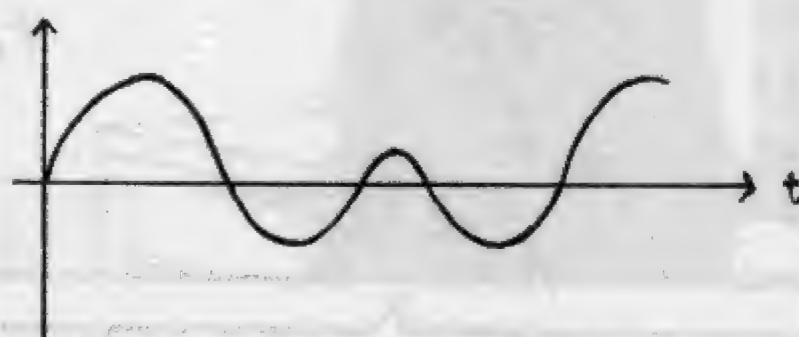


＜振幅调的波形＞

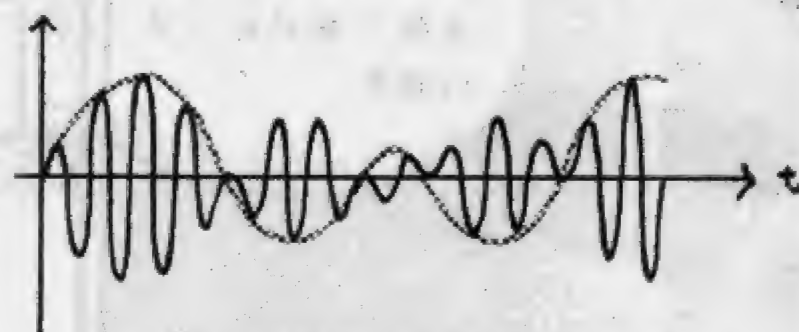
振幅调制波的实际波形是这样的。



(a) 载波 (AM 的主要频率的波)



(b) 信号波 (被输送的声音信号的波)



(c) AM 调制波 (电波原有的波形)

谱则可以考虑如刚才的图 4.1 一样。

唉！

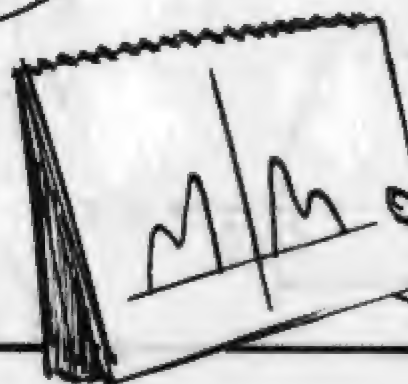
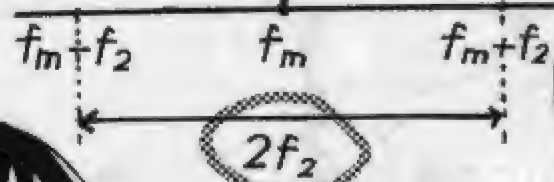


图 4.1 表示的是根据声音信号的大小来调整输送频率的大小。

所以它与信号波相似啊。

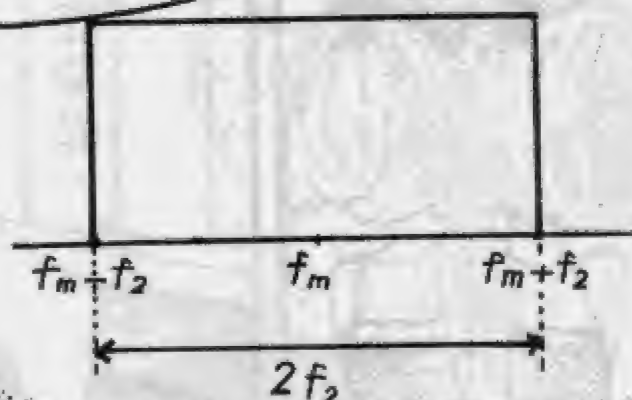


放大调制波的波段范围是 $2f_2$ 。

所以如图 4.1 所示，如果没有只有谱被放大的电路，就不能得到希望接收的广播站的电波。

是吗？

因此，这样的频率特性就会形成理想的调谐放大电路的形状。



调谐放大电路的理想频率特性



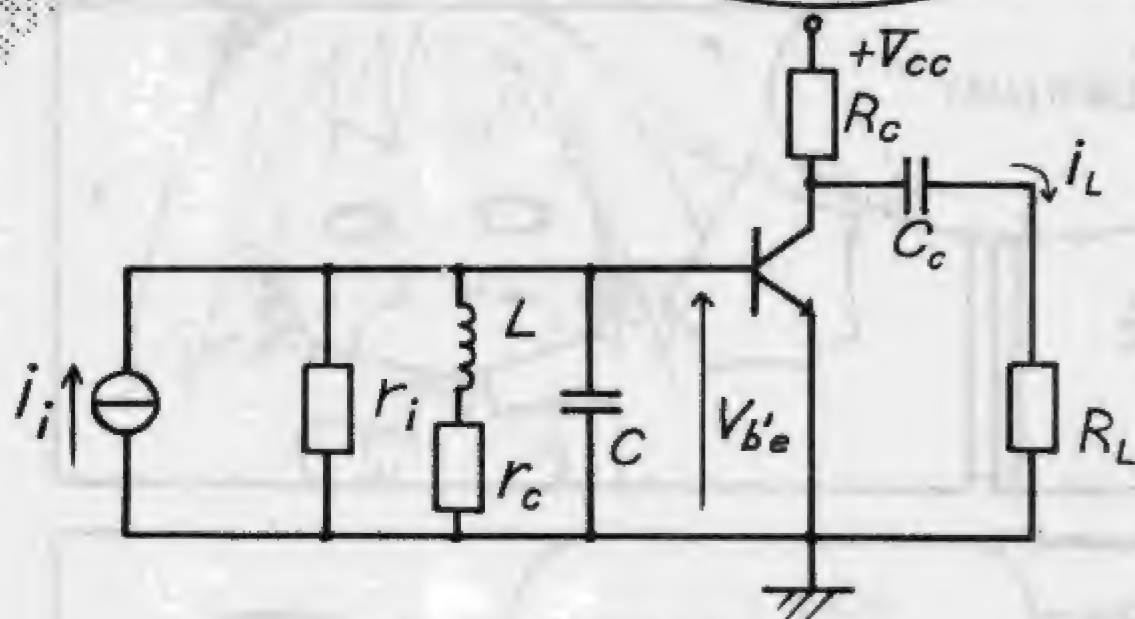


2 单一调谐放大电路



那么，
这是什么啊？

这与发射极接地放大电路
相似，它也是调谐放大电
路吗？

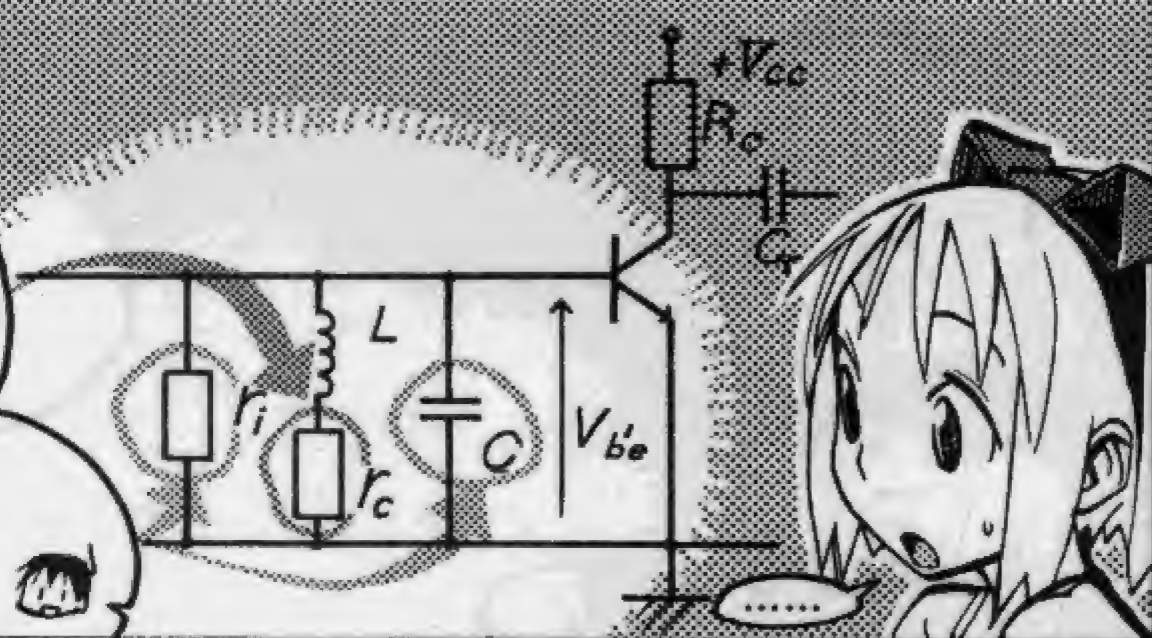


●图 4.2 调谐放大电路

是呀！

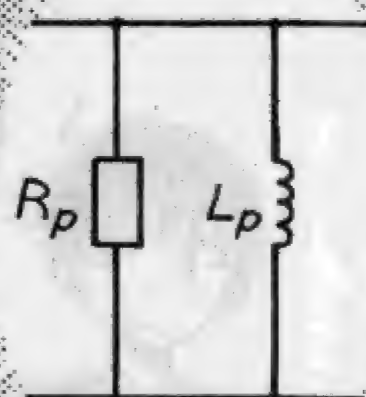
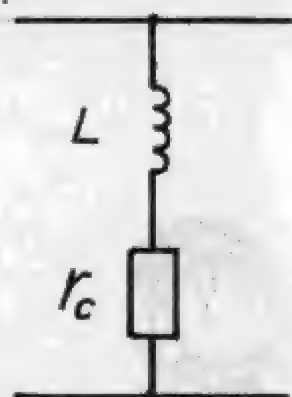
而且，
与发射极接地放大电路相比，
这个电路左半部分的输入部分
是电阻 R 、线圈 L 与电容 C 交
叉在一起的状态。

另外，线圈 L 中包含线圈的电阻损失 r_c ，并且输入电阻 r_i 与电容 C 形成串并联，所以分析会变得很难。



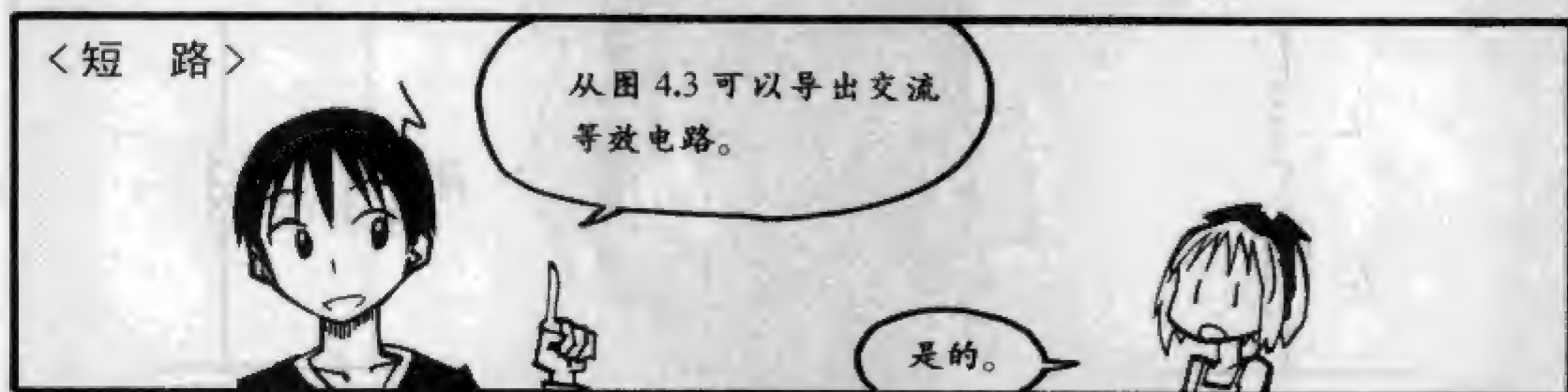
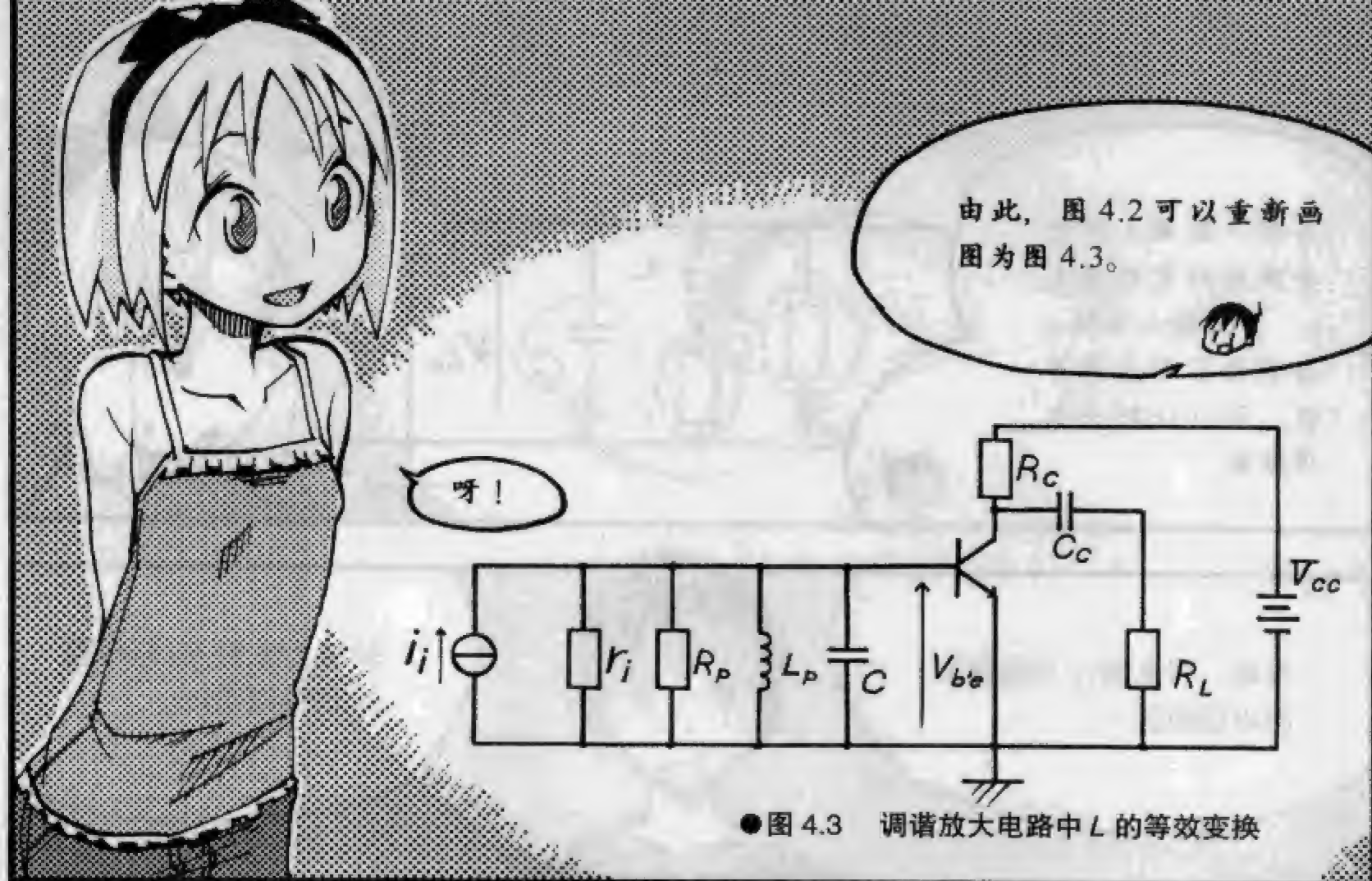
因此，将电阻 r_c 与线圈 L 的串联阻抗

转换为电阻 R_p 与线圈 L_p 的并联阻抗。



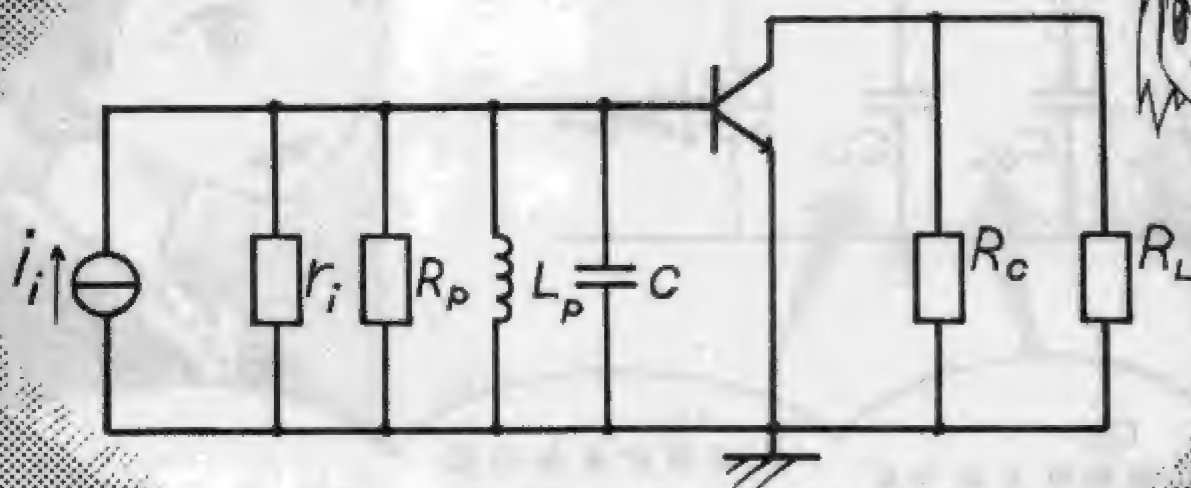
为什么要这样做呢？

这样的话，输入部分就可当作电阻、线圈、电容的并联电路。



由此，图 4.3 可以这样重新进行描述。

以前短路的地方消失了吧。



●图 4.4 调谐放大电路中等效电路的转换

< 高频等效电路 >

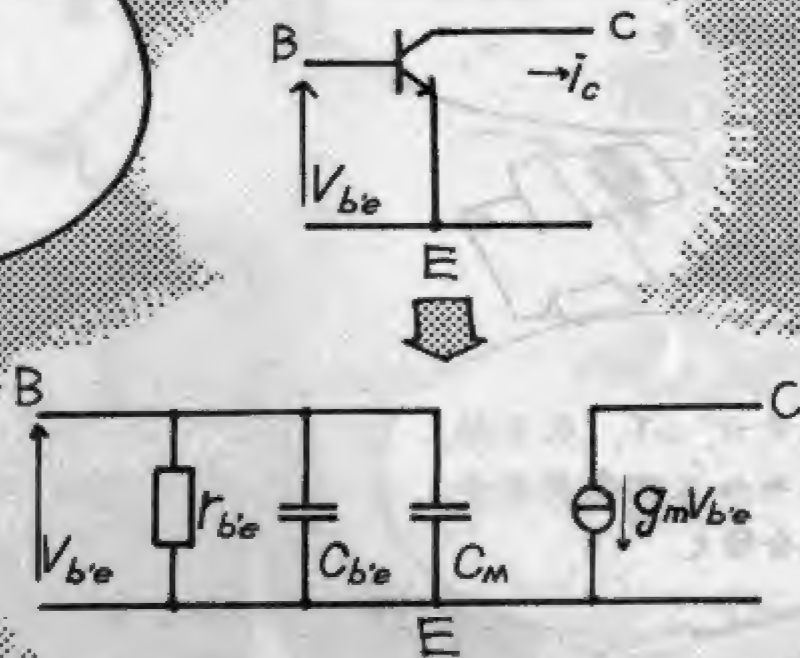
并且，由此可以重新画为高频等效电路。

高频？

同一般电波一样，人的耳朵会听不见频率高的。

是的。

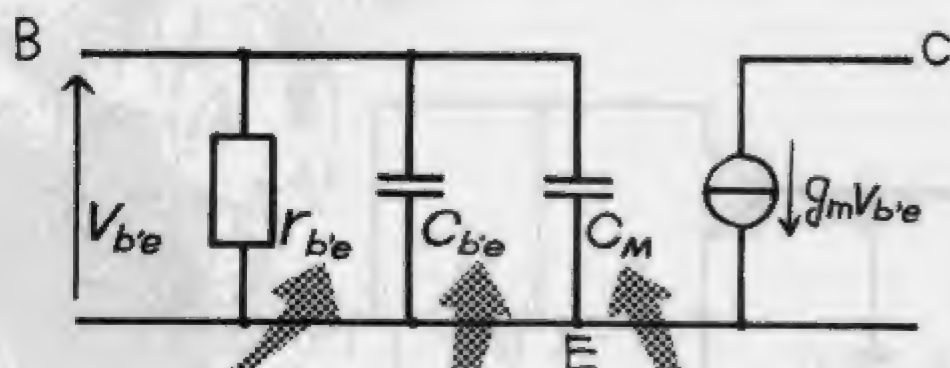
晶体管部分的高频等效电路可画图。



●图 4.5 晶体管的高频等效电路

< 寄生容量与镜子效应 >

< 在高频等效电路中 >



$r_{b'e}$
基极与发射
极之间出现
的电阻

$C_{b'e}$
在高频时基极与发
射极之间出现的寄
生容量

C_M
在高频时基极与集
电极之间出现的考
虑了镜子效应的寄
生容量

3个关系成立。

那个

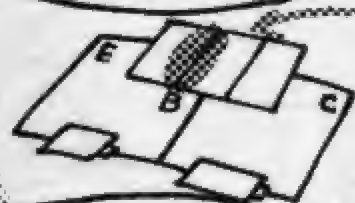
寄生容量是什么啊？

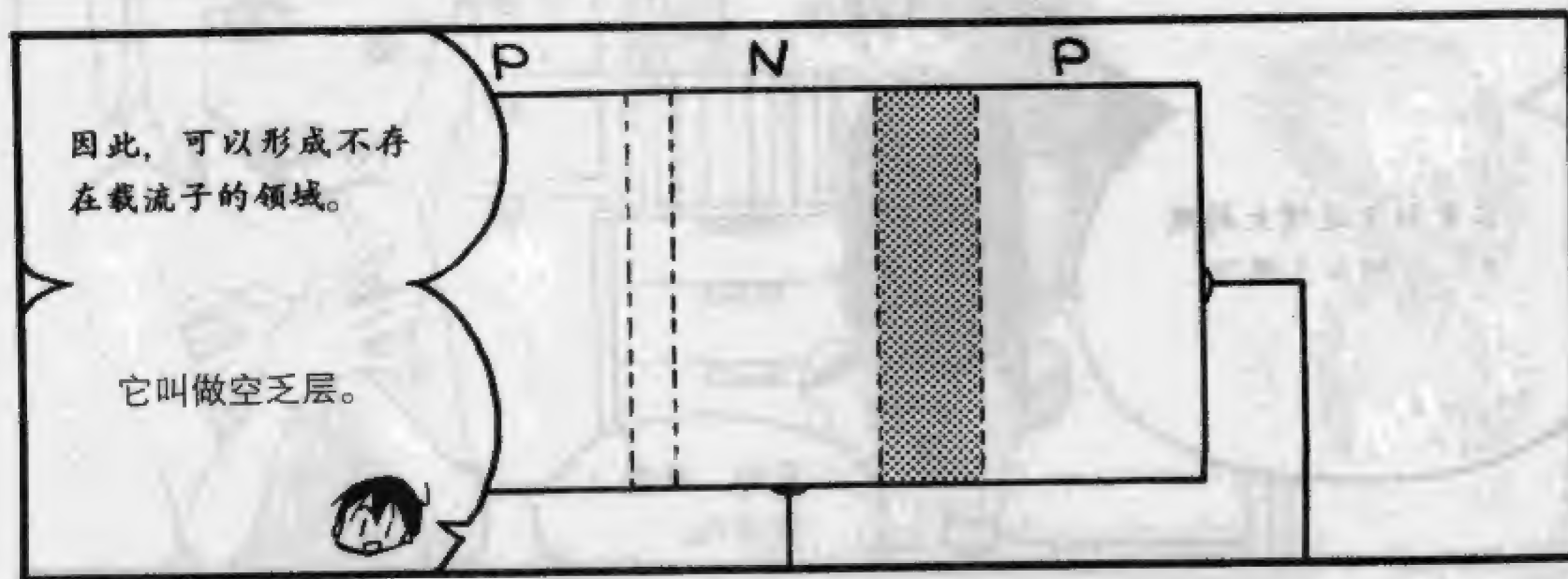
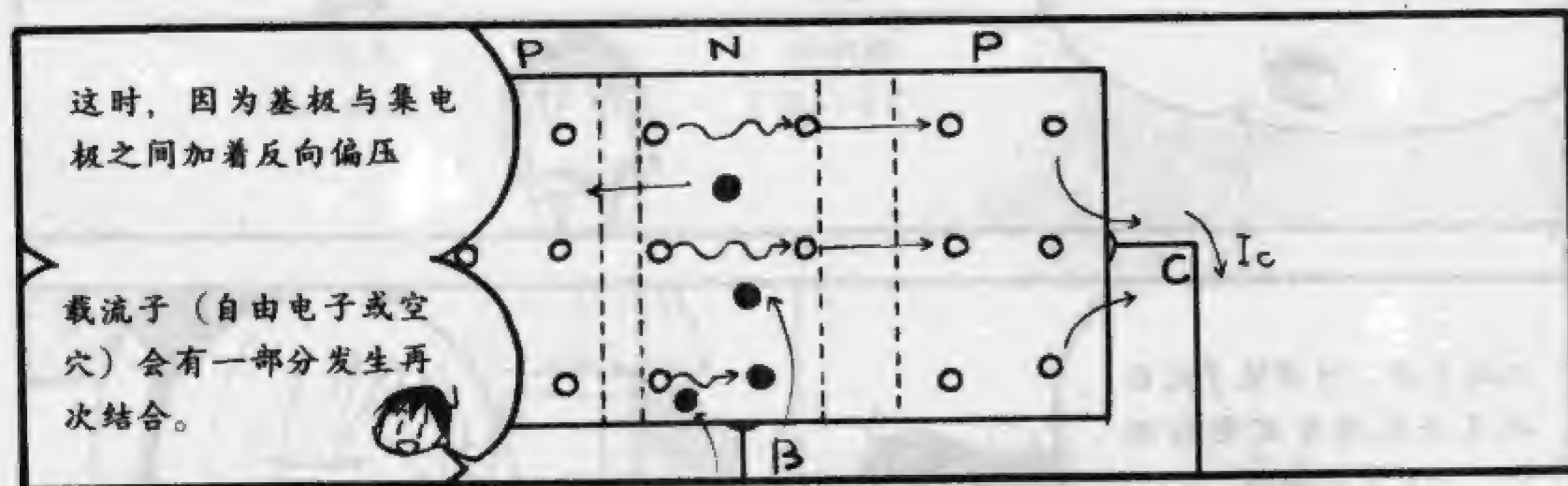
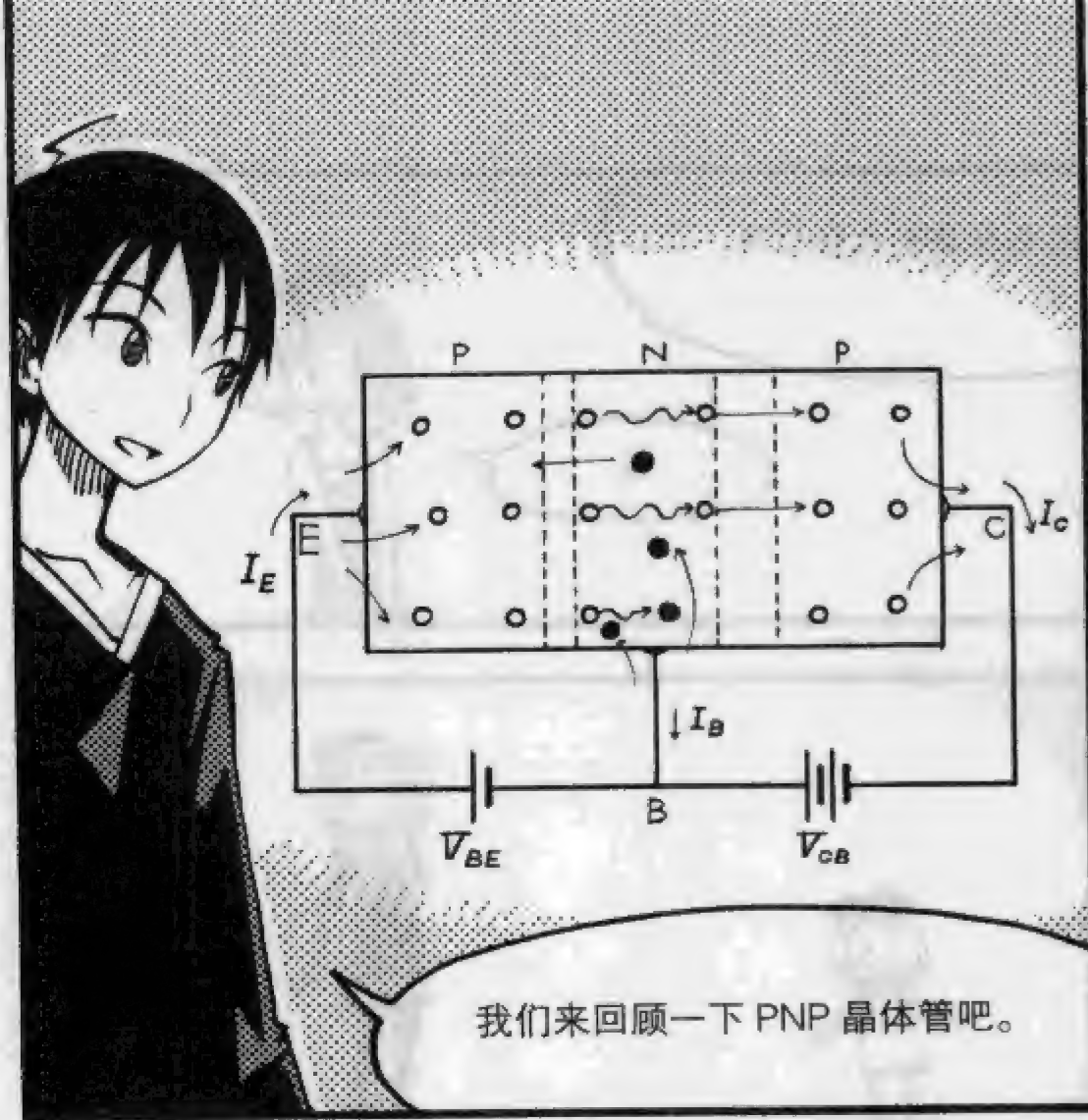
但如果是这样，只有
 $C_{b'e}$ 也是可以的。

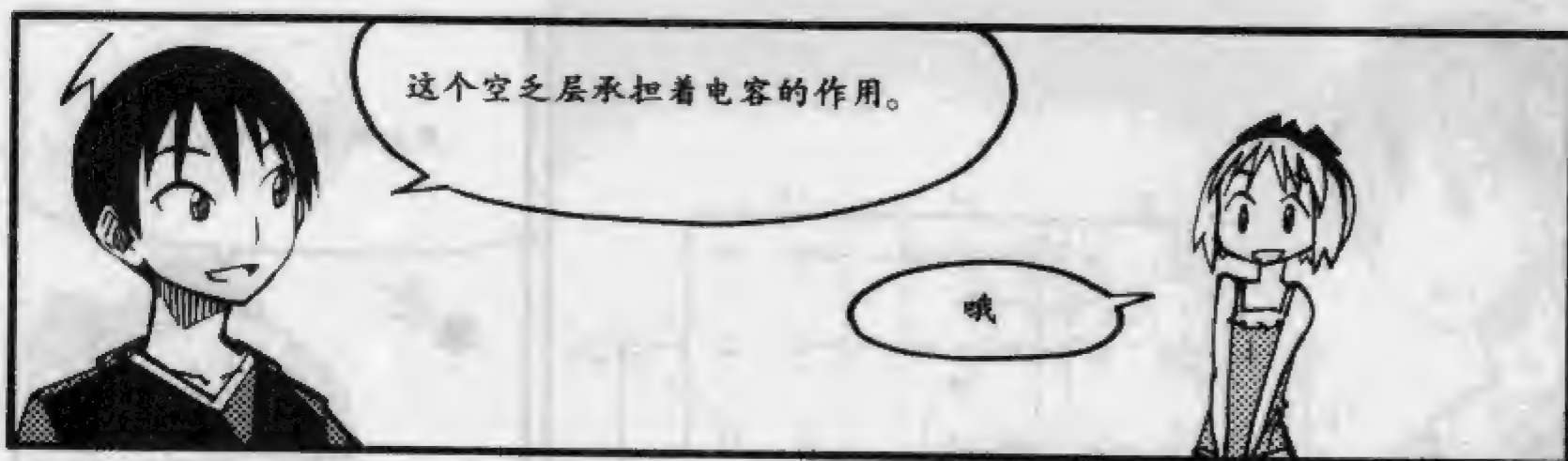
所谓的镜子效应是什
么呀？

基极与发射极之间如增加交
流信号，这个区间会有如电
容一样的现象。寄生容量就
是指那个容量。

顺便说一下，信号的
频率如果变高其容量
也会增大。







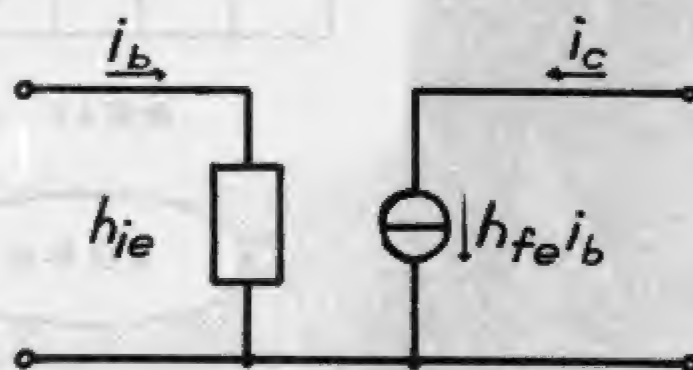
＜高频等效电路化简＞

从现在开始会变得有些复杂了。

是的。

如之前说明的，发射极接地放大电路中的h参数等效电路

其输出部分的电流源是 $h_{fe}i_b$ 吧？



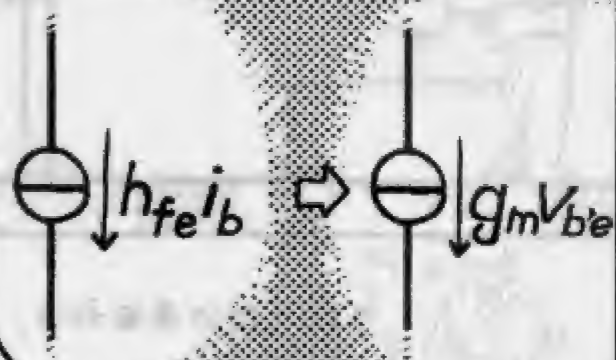
是，是的。

但在输入一侧，相比用基极电流来考虑，

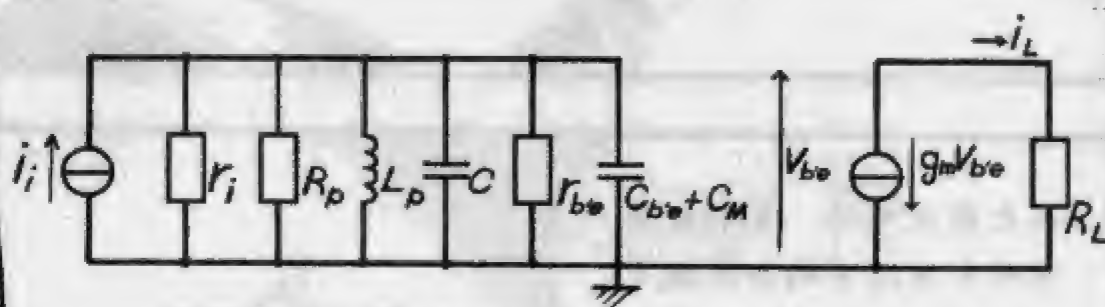
用基极与发射极之间的电压来考虑的话，更容易理解。

所以用 $g_m V_{be}$ 代替电流源 $h_{fe}i_b$ 来考虑。

沙沙



以此为前提，利用图 4.5 从图 4.4 来画高频等效电路。



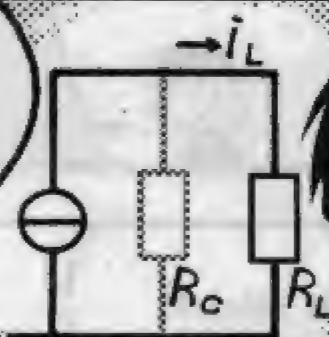
●图 4.6 调谐放大电路中的高频等效电路

是这样的！

R_c 没有了。

如果 R_c 比 R_L 大很多的话， R_c 中则几乎不会有电流流动。

因此，可以忽略不计。



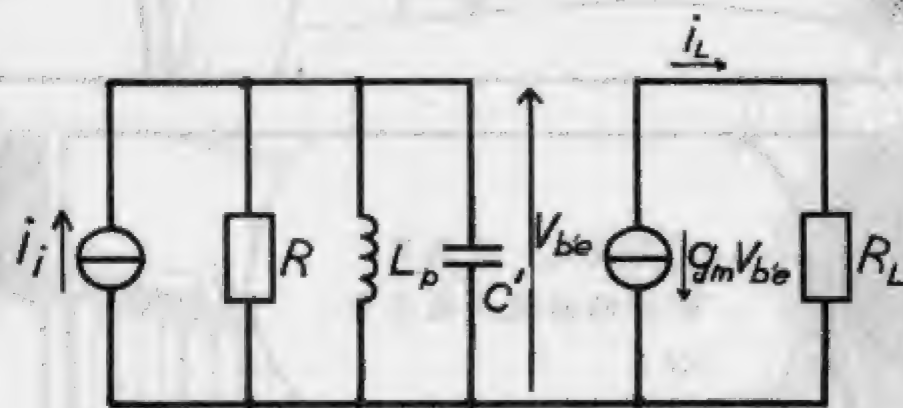
并且，整理电容的并联部分，

$$C' = C + C_{b'e} + C_m$$

再整理电阻的并联部分，

$$R = r_i // R_p // r_{b'e}$$

图 4.6 就可这样化简。



●图 4.7 在调谐放大电路中的高频等效电路的化简

真的是变得相当简单了呢！

至此，调谐放大电路就大体上讲完了。

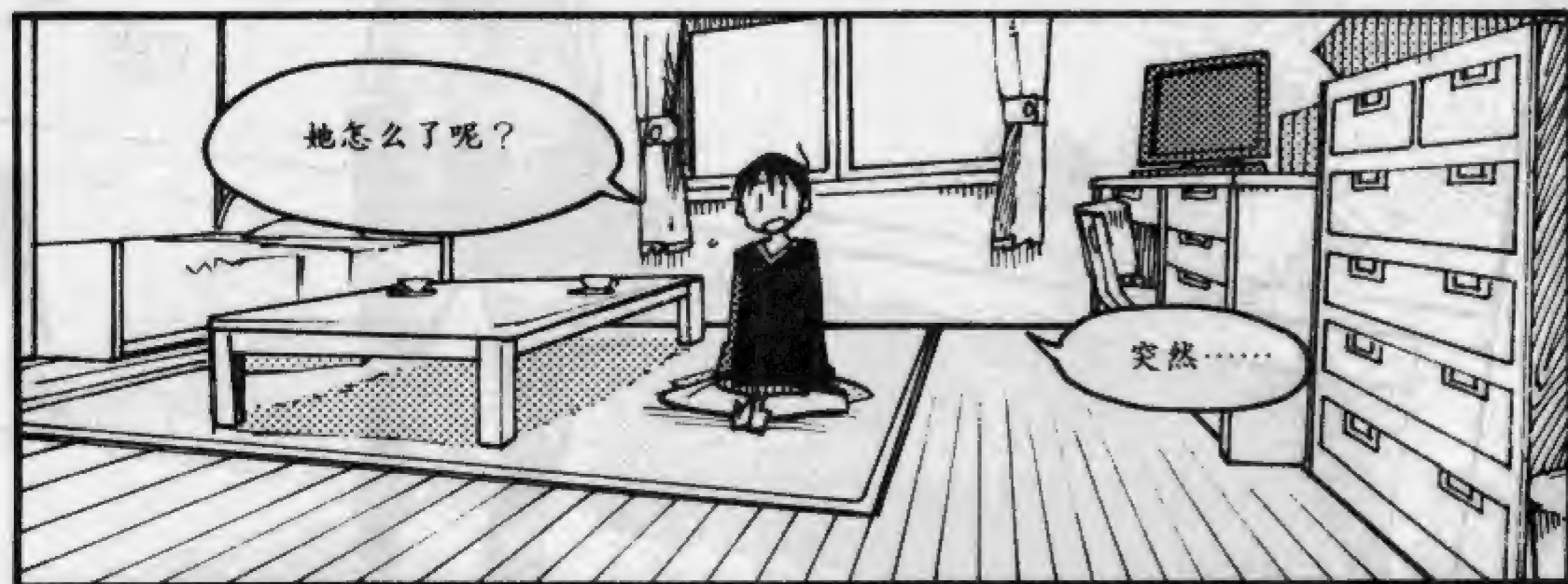
关于电路的电流放大率与频率特性，以后我会进行说明的。

好的，

请多关照。







补充知识



调谐放大器中的电流放大率的频率特性

在图 4.7(P97) 中, 电流放大率 A_i 用输入一侧的电流 i_i 与输出一侧的电流 i_L 之比来表示。

$$A_i = \frac{i_L}{i_i}$$



这里输入一侧的电流 i_i 与输出一侧的电流 i_L 可以这样表示。

$$i_i = \left(\frac{1}{R} + j\omega C' + \frac{1}{j\omega L_p} \right) v_i$$

$$i_L = -g_m v_{be}$$



整理这个公式的话就是这样的。

$$A_i = \frac{-g_m R}{1 + jQ_i \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)}$$

这里, 共振角频率 (在输入一侧流动的电流最大时的角频率) 为 ω_0 , 共振电路的品质因数 (表示的是这个值越大, 共振角频率中的 A_i 增大, 共振角频率以外的 A_i 则减小) 定为 Q_i , 则可以定义为下面的公式。

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_p C'}} = 2\pi f_0$$

$$Q_i = \frac{R}{\omega L_p} = \omega_0 C' R$$



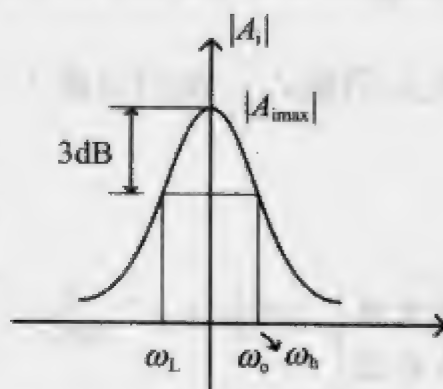
将这个代入前面的公式就可以导出频率特性。

$$A_i = \frac{-g_m R}{1 + jQ_i \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)}$$

利用此公式，我们试试来导出调谐放大器的频率特性吧。

$$|A_i| = \frac{g_m R}{\sqrt{1 + Q_i^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}}$$

因此可以用以下的图来表示。



●图4.A1 调谐放大电路中的电流放大率的频率特性

图 4.A1 以角频率 ω (希腊字母) 为横轴，以电流放大率 A_i 为纵轴来表示频率特性。

从此图可以了解，角频率为 ω_0 ，无论角频率的高低，电流放大率则都会降低。利用此特性，通过调整电容的值，使想听的广播站的频率 $f(\text{Hz})$ 乘以 2π 后等于 ω_0 。由此，就可以提取想听的广播站的电波频率。



这里， ω_h 与 ω_L 分别是最大电流放大率 A_{imax} 减少 3dB 的频率，如下所示。

$$\omega_h = \omega_0 + \frac{\omega_0}{2Q_i}$$

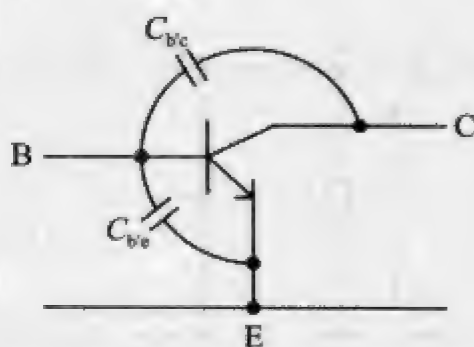
$$\omega_L = \omega_0 - \frac{\omega_0}{2Q_i}$$

同时，波段为 $\omega_h - \omega_L$ 。这个波段与 (漫画中) 谱的图所显示的 $2\omega_m(2f_m)$ 相同是最理想的。

再者，关于收音机，此章所述的调谐放大电路得到的波形并不能获取声音。原因在于：从调谐放大电路获得的信号波形已经是被调制过的波形。因此，必须从获得的 AM 调制中提取声音成分。

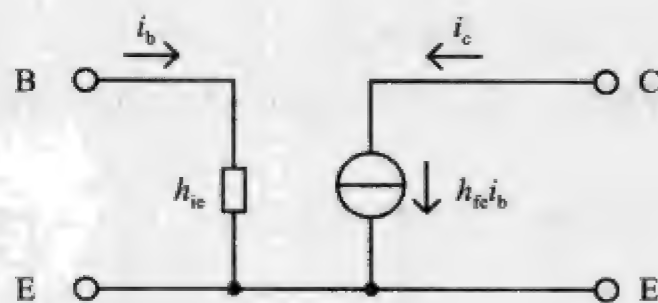
► 晶体管的高频等效电路

晶体管中在PN结部分会产生寄生容量。据说寄生容量在高频领域是不能忽视的。但是，如果将基极与发射极之间发生的寄生容量定为 $C_{b'e}$ ，基极与集电极之间产生的寄生容量定为 $C_{b'c}$ ，如图 4.A2 所示。

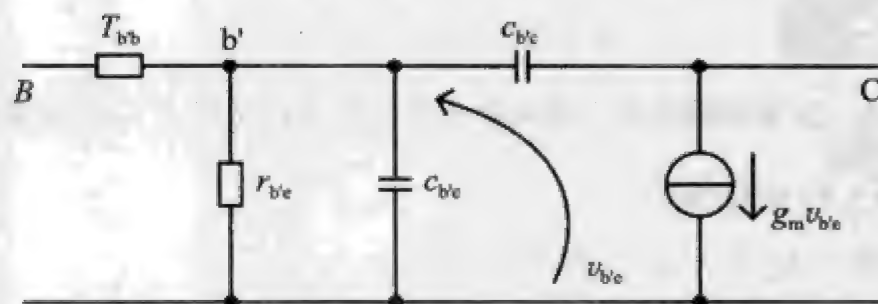


●图4.A2 晶体管中产生的寄生容量的概念

具有寄生容量的晶体管的等效电路如图 4. A3 所示，换言之，就是在化简了的等效电路 (P72) 的基极与发射极之间连接了 $C_{b'e}$ ，在基极与集电极之间连接了 $C_{b'c}$ 。



(a) 不包含寄生容量状态下的晶体管等效电路

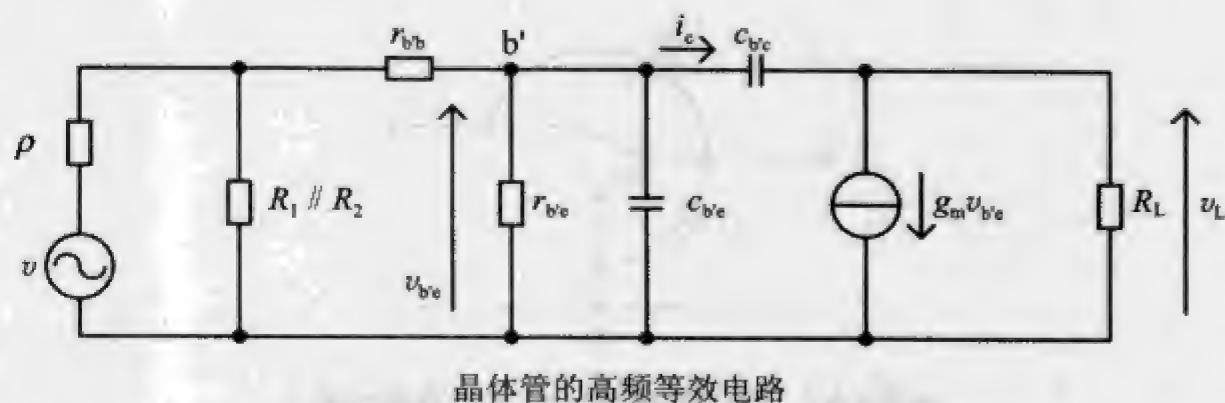


(b) 包含寄生容量的晶体管等效电路

●图4.A3 具有寄生容量的晶体管等效电路

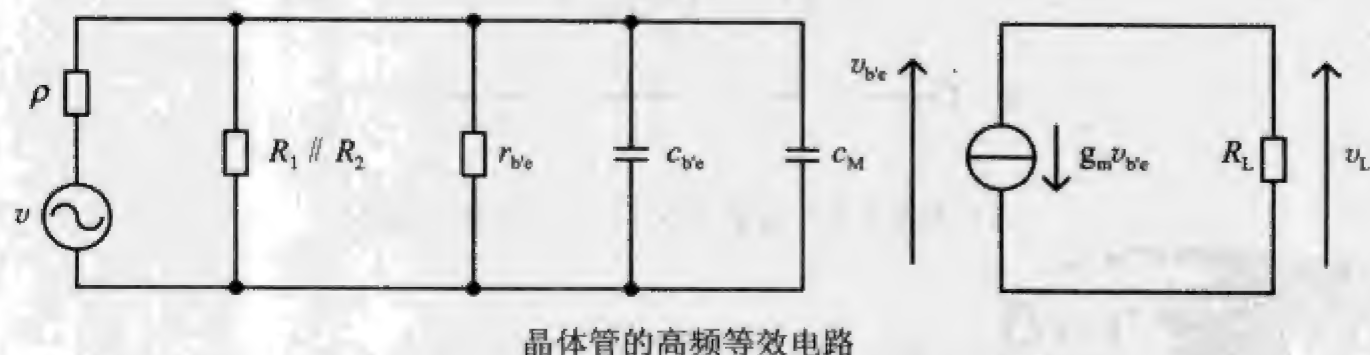
在图 4.A3 中, r_{bb} 为基极电阻, 大小为 10Ω 。 $r_{b'e}$ 为基极与发射极之间的电阻, 与 h_{ie} 意义相同。同时, 为了之后的讨论更加容易, 电流源 $h_{fe} \cdot i_b$ 用 $g_m \cdot v_{b'e}$ 表示, 并由 $v_{b'e}$ 控制。

那么, 来考虑如图 4.A4 所示的发射极接地放大电路的等效电路。这个电路同第 6 章讨论的等效电路是一样的。但在这里它考虑了晶体管的寄生容量。只是在第 6 章所阐述的频率只是声音频率而已, 寄生容量的影响不大。



●图4. A4 根据发射极接地放大电路的交流等效电路, 在晶体管中利用图4. A3的情况

在这里, 重新画图使 $C_{b'c}$ 与 $C_{b'e}$ 并联。其原因在于: $C_{b'c}$ 与 $C_{b'e}$ 并联的话, 合成容量可以通过各自的容量的和来表示。同时, 在 h 参数等效电路中, 将输入部分的 h_{ie} 与输出部分的 $h_{fe} \cdot i_b$ 进行分离如第 6 章所示可以进行简单的讨论, 这时, 分离为包括 $C_{b'e}$ 的左侧与 $g_m \cdot v_{b'e}$ 与 R 之间的环, 这样讨论会变得简单, 因此进行这样的作业就变为图 4.A5 的情况。



●图4. A5 发射极接地放大电路的交流等效电路 (图4. A4的重新画图)

从图 4.A4 向图 4.A5 转换的顺序:

- ① 基极电阻 r_{bb} 的值比较小, 可以忽略不计。
- ② 流动在基极与集电极之间的寄生容量 $C_{b'c}$ 中的电流如下所示,

$$i_c = j\omega C_{b'c}(v_{b'e} - v_L)$$

③ 但如果 $R_L \gg 1/(j\omega C_{bc})$, $g_m \gg j\omega C_{bc}$, i_c 流入负荷电阻则可以忽视, 因此

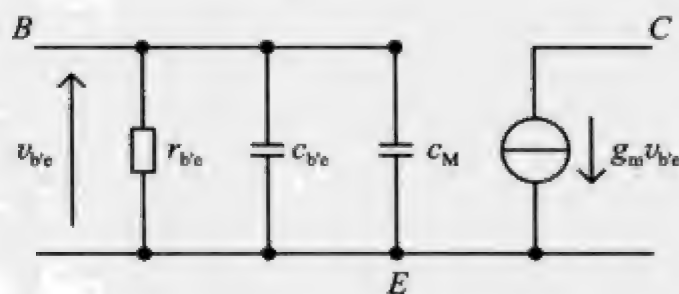
$$v_L = +g_m R_L v_{be}$$

④ 从以上的两个公式中可以得出 $i_c = j\omega C_{bc}(v_{be} - v_L) = j\omega C_{bc}(1 + g_m R_L)v_{be}$, 因此起因于基极与集电极之间的寄生容量的阻抗 Z_{bc} 如下所示。

$$Z_{bc} = \frac{v_{be}}{i_c} = \frac{1}{j\omega C_{bc}(1 + g_m R_L)} = \frac{1}{j\omega C_M}$$

⑤ 这样, 则 $C_M = C_{bc}(1 + g_m R_L)$, 因此一看到基极与集电极之间的寄生容量, 就会变为 $1 + g_m R_L$ 倍。这被称为镜子效应, C_M 称为镜子容量。

如上所述, 如图 4-A6 所示, 可以导出晶体管的高频等效电路。



● 图4.A6 重新画图的晶体管的高频等效电路 (与图4.7相同)

► 阻抗的转换

在 P89 的左图中, 导纳 (阻抗的倒数) Y_1 为

$$Y_1 = \frac{1}{r_c + j\omega L} = \frac{r - j\omega L}{r_c^2 + \omega^2 L^2}$$

右图中导纳 Y_2 为

$$Y_2 = \frac{1}{R_p} + \frac{1}{j\omega L_p}$$

如果 $Y_1 = Y_2$ 关系成立的话,

看实部则为

$$R_p = \frac{r_c^2 + \omega^2 L^2}{r_c}$$

看虚部则为

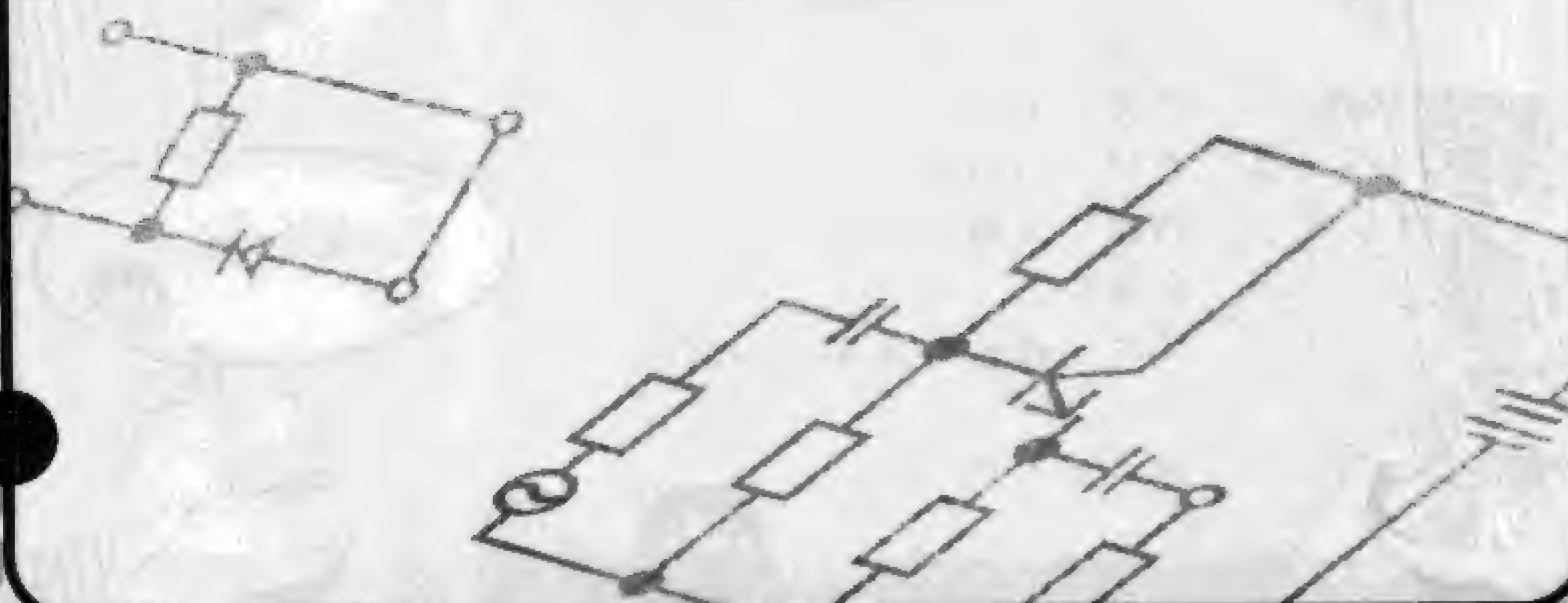
$$L_p = \frac{r_c^2 + \omega^2 L^2}{\omega^2 L}$$

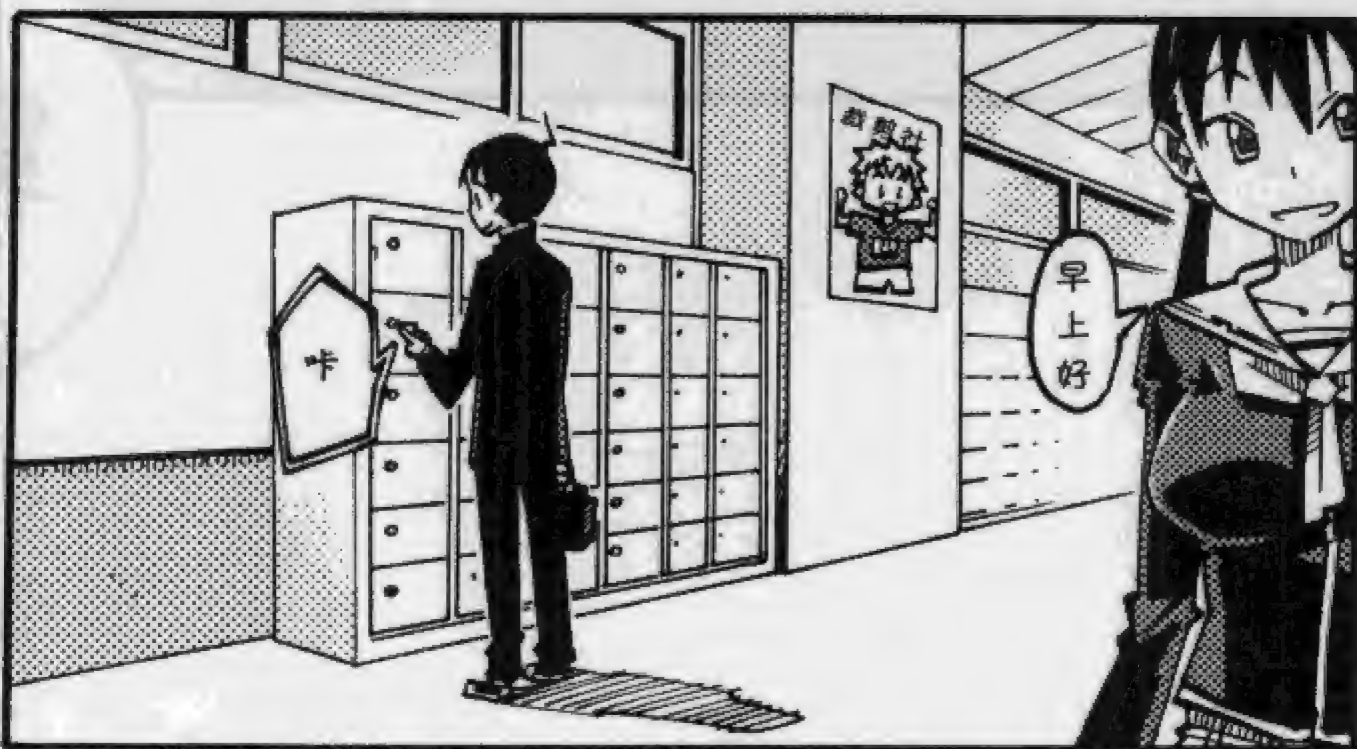
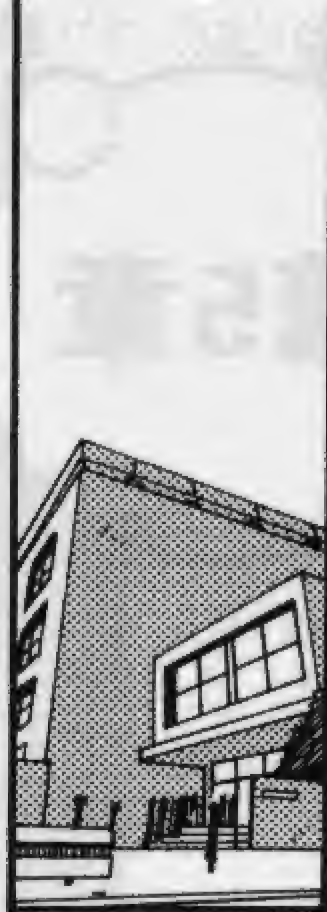
因有此关系，这样就可以进行串联与并联的转换。



第5章

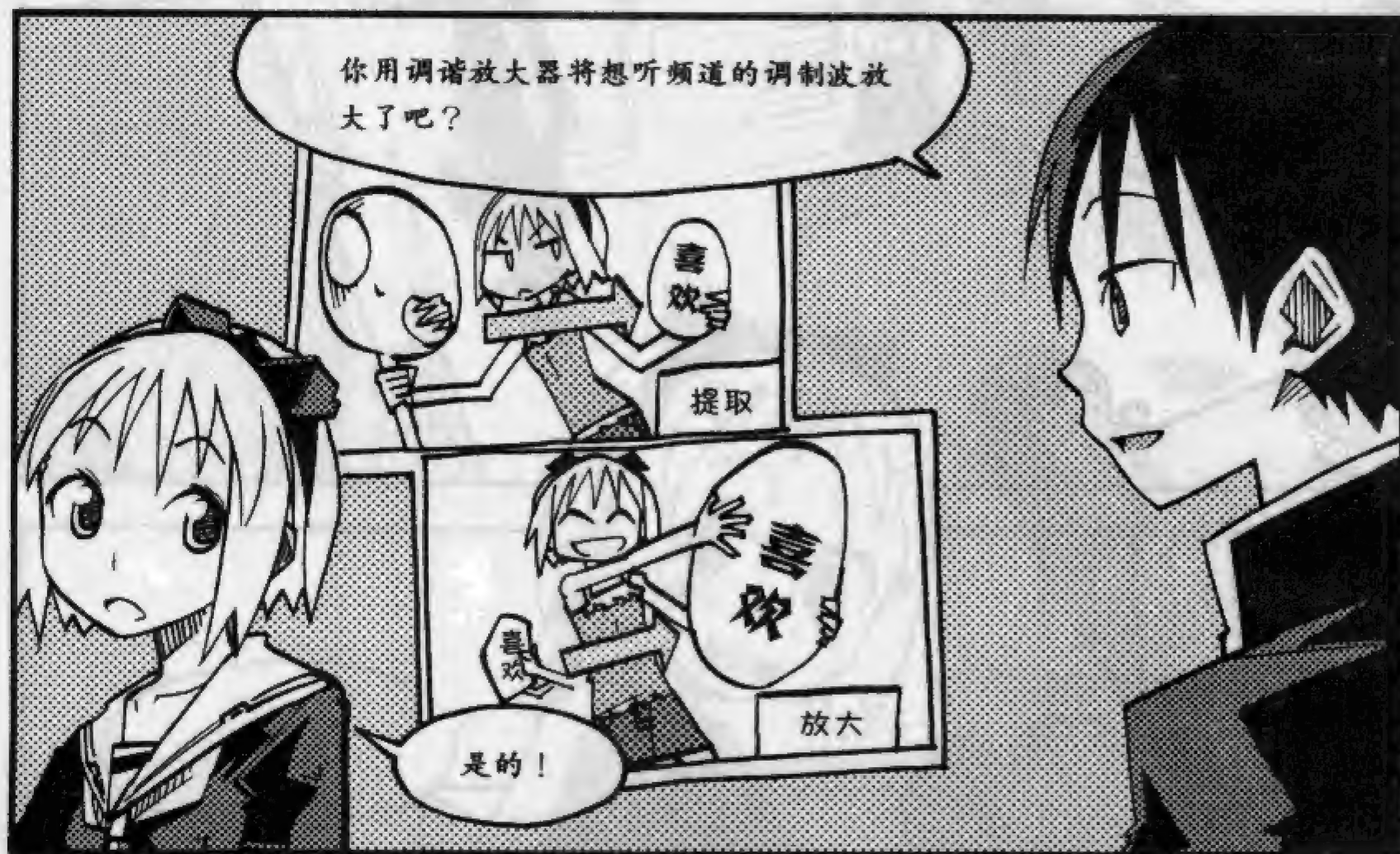
检波电路







1. 检波与线性检波电路



<检波>

从被放大的调制波中提取声音信号就叫做检波。

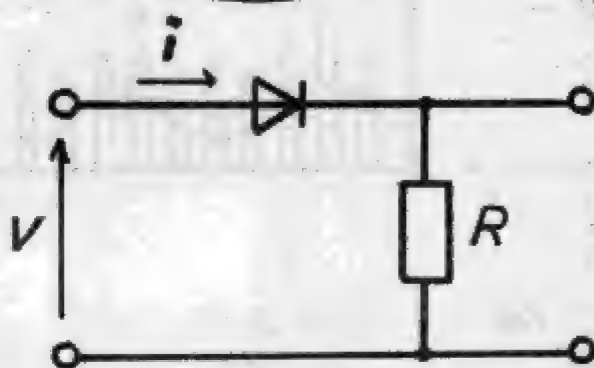
喜欢!

如果不做这个检波操作,就不能听到声音。

那怎么进行检波呢?

<线性检波电路>

使用线性检波电路将对 AM 调制波进行检波。



线性检波电路

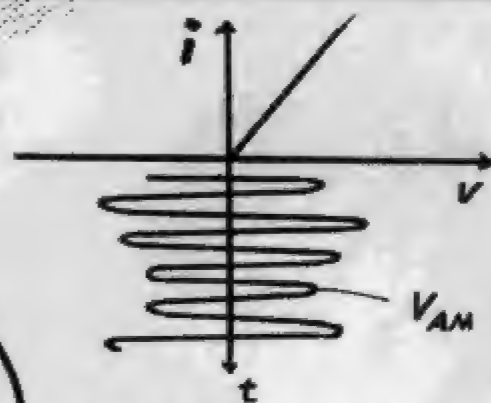
左侧为输入, 右侧为输出, 对吧?

< 线性检波的原理 >

我来说明一下线性检波的原理吧。

好的。

这个波是从调谐放大器中获得的信号。



从调谐放大器中获得的信号

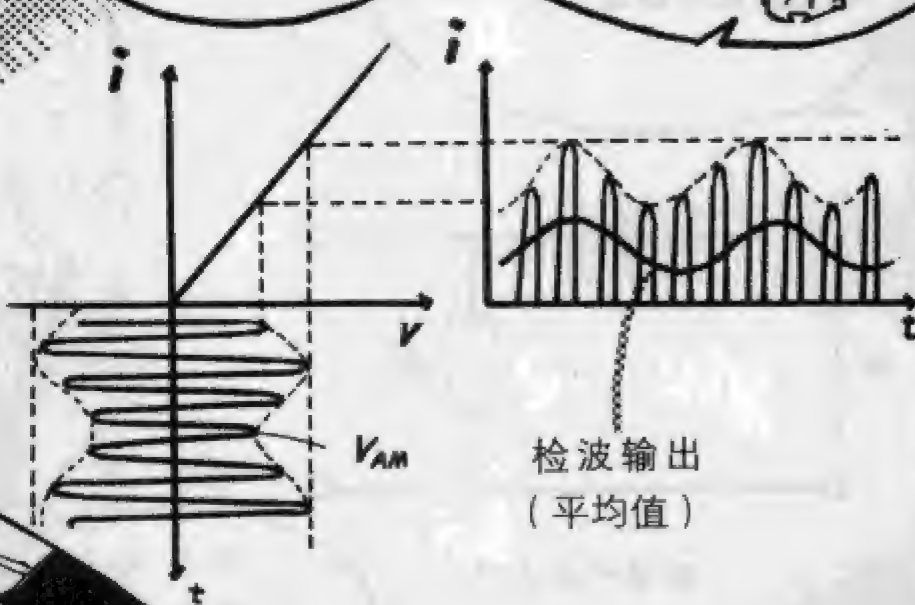
这个波是用线性检波获得的波。



用线性检波获得的波

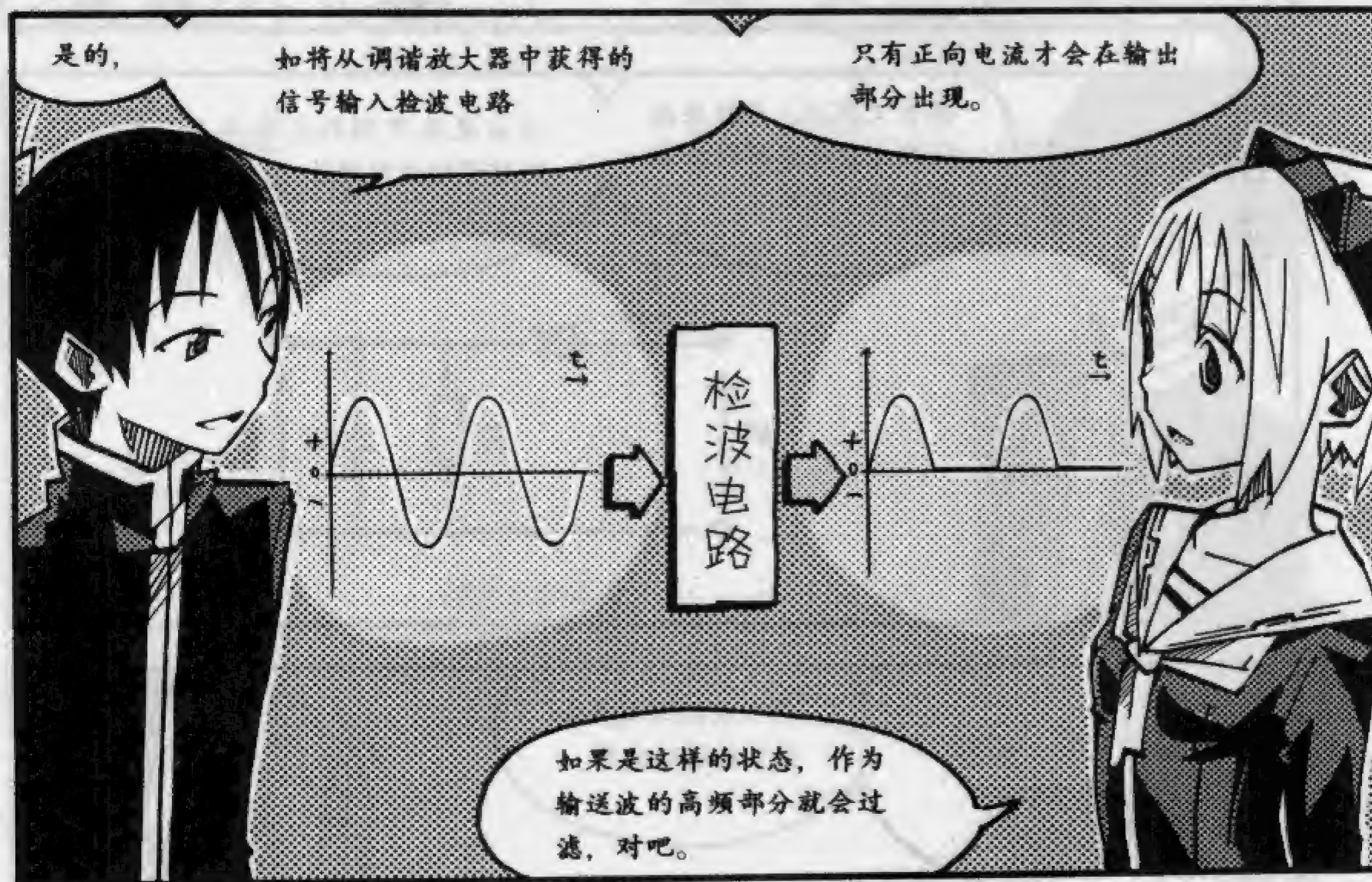
取其平均值就可形成一个较粗的波。这个粗波叫做检波输出。

为了得到检波输出，需要使用滤波器。

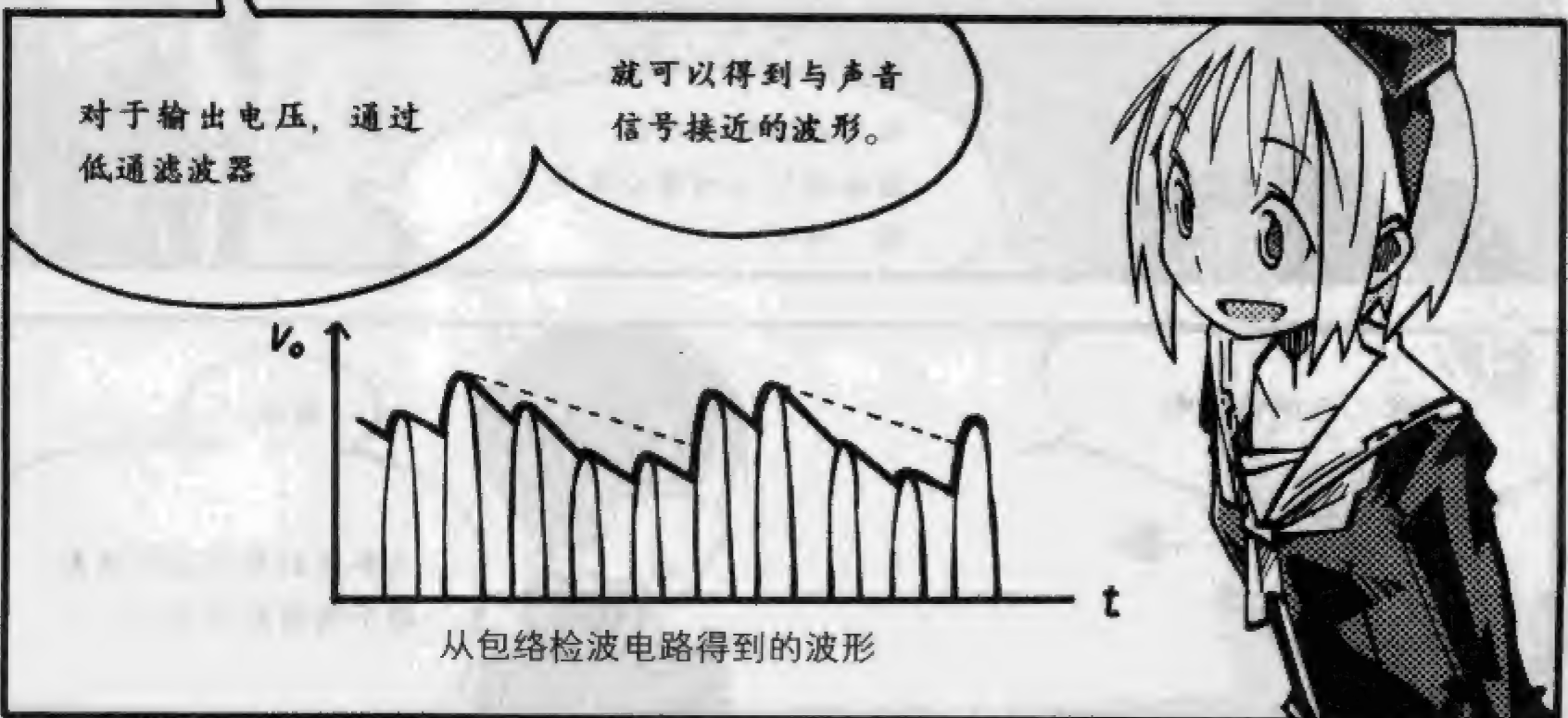
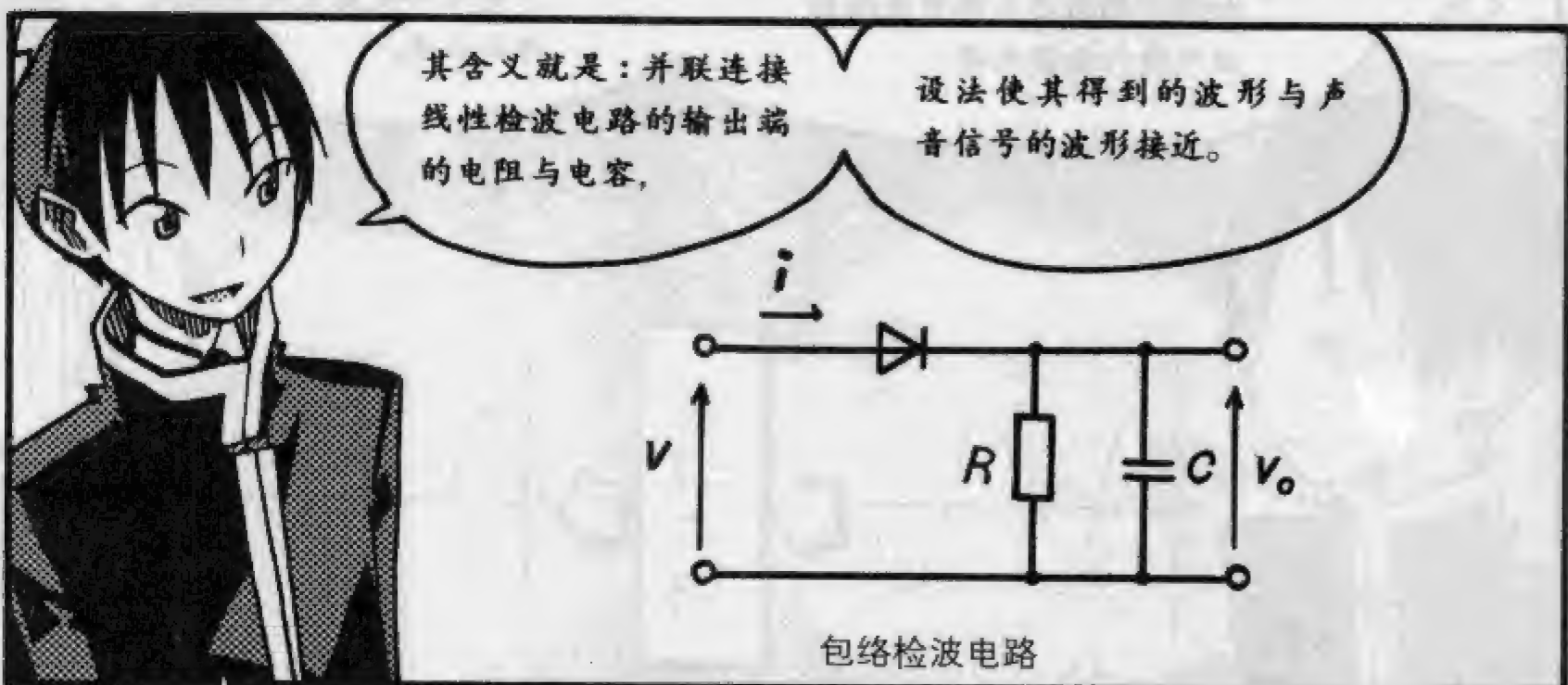


滤波器？

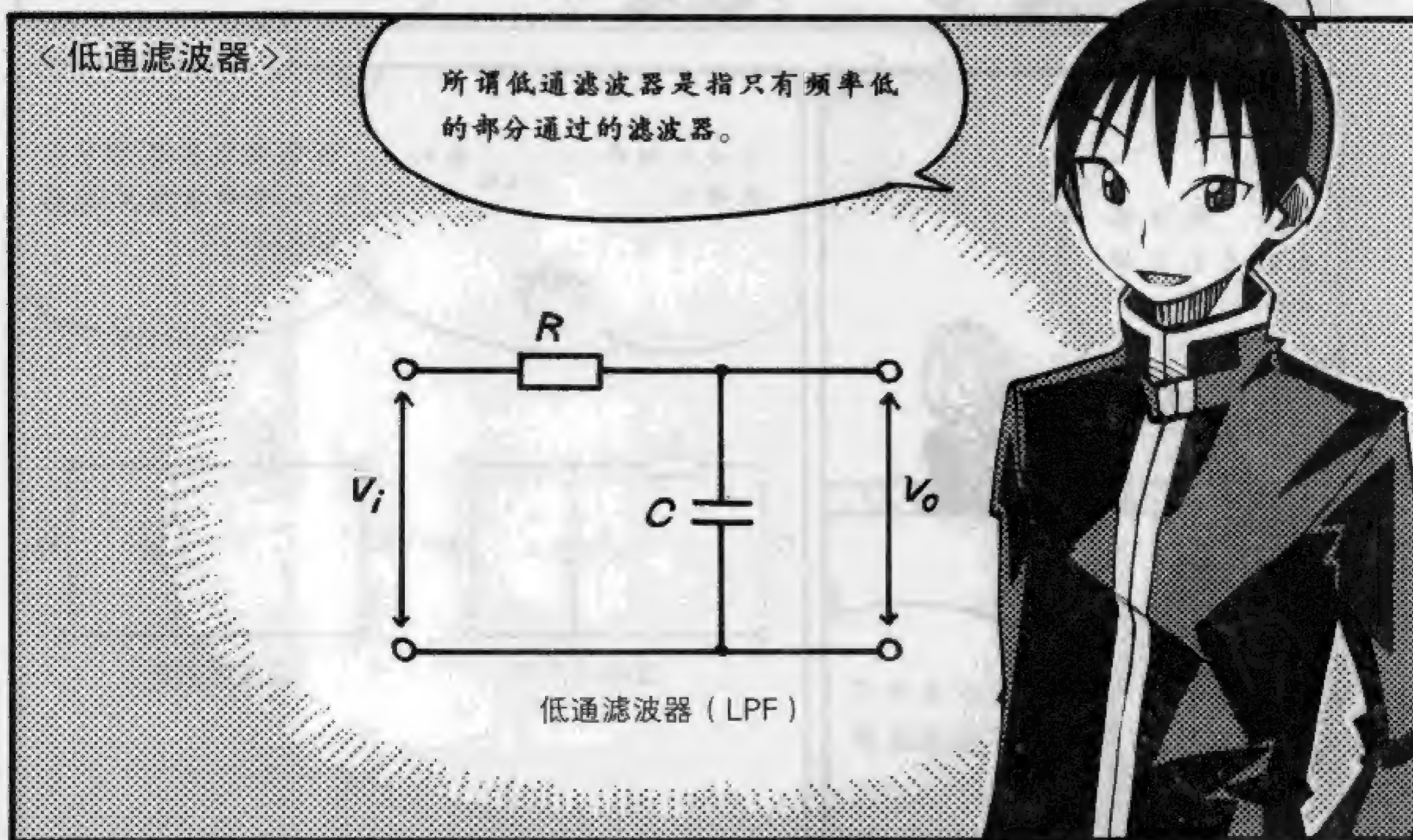
嗯，
我会在后面说明滤波器，在那之前，



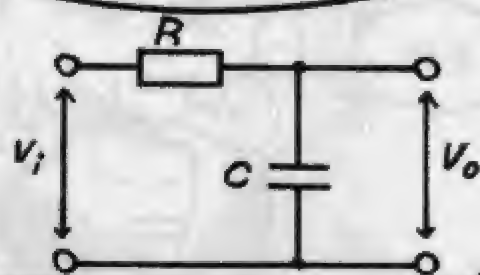
2. 包络检波



3. 滤波器



在低通滤波器中，如果输入端的电压定为 v_i ，输出端的电压定为 v_o ，



电压增益则是这样的。

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{1}{1+j\omega CR}$$

在此公式中，如角频率 $\omega (=2\pi f)$ 变大，电压增益 A_v 则变为 0。

由此可以说它具有使比频率 $f = \frac{1}{2\pi CR}$ 低的波通过的功能。

$$A_v = \frac{1}{1+j\omega CR}$$

因高频与 0 接近，所以可以阻断。

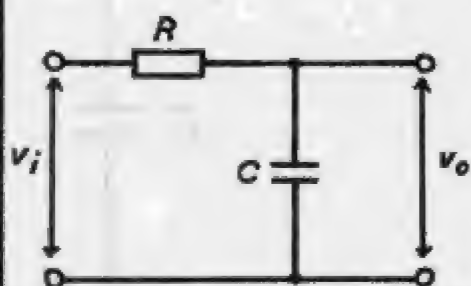
< 高通滤波器 >

那么，高通滤波器是怎么样子的呀？

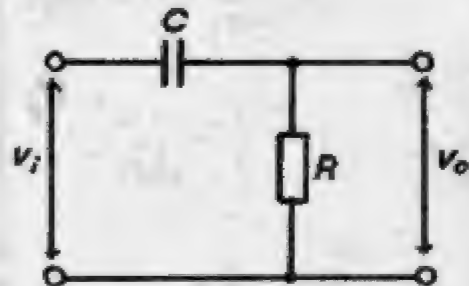
你可以认为它与低通滤波器相反。

它使比频率 $f = \frac{1}{2\pi CR}$ 高的波通过。

将低通滤波器的 R 与 C 互换的话就变成高通滤波器了。



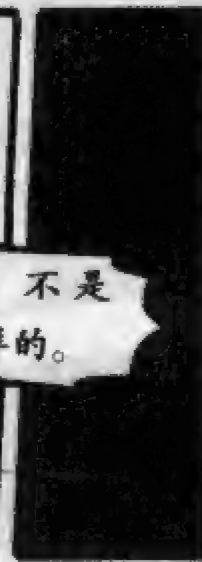
低通滤波器



高通滤波器







我被甩了！



等一下……
小绫！！？这样的
你，我可有点不太
喜欢。

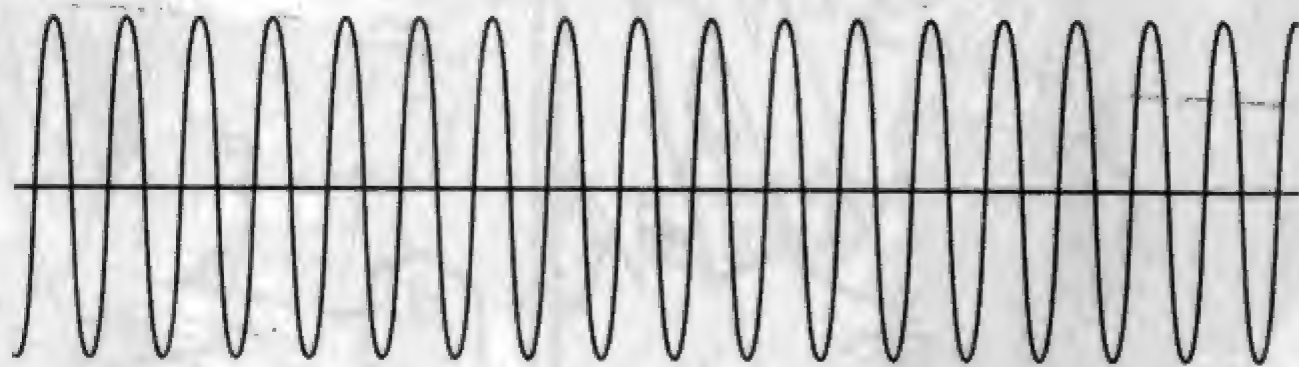


补充知识

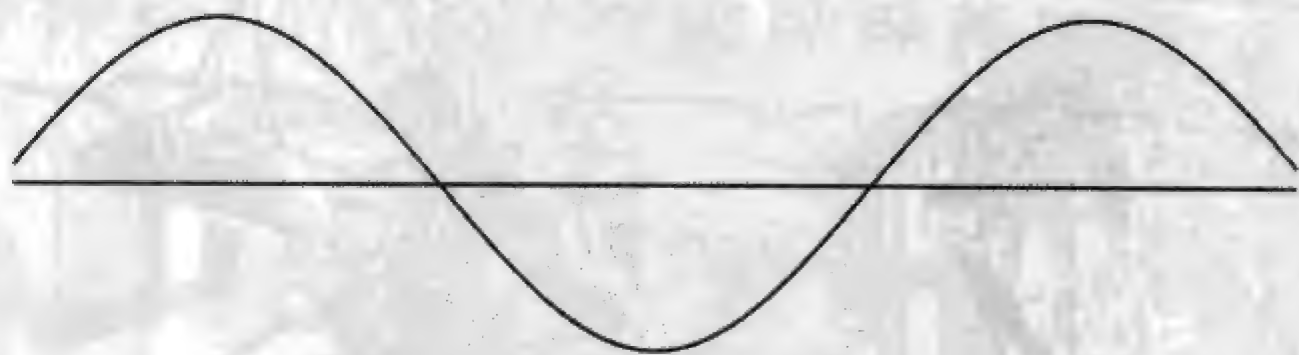
关于 FM(频率调制)

本书中所述的收音机使用的是 AM (振幅调制)。在这里针对另一个广泛应用的 FM (频率调制) 进行说明。

所谓频率调制是指在 FM 广播的情况, 对于 76.0~90.0MHz 的载波, 根据信号的大小, 发信电波的频率也会相应发生变化。换言之, FM 调制波是以输送频率 (由广播站决定, 如果是 NHK-FM, 在东京为 82.5MHz) 为中心, 根据信号的大小, 波的疏密程度会相应发生变化 (频率变高或者变低) 的方式。

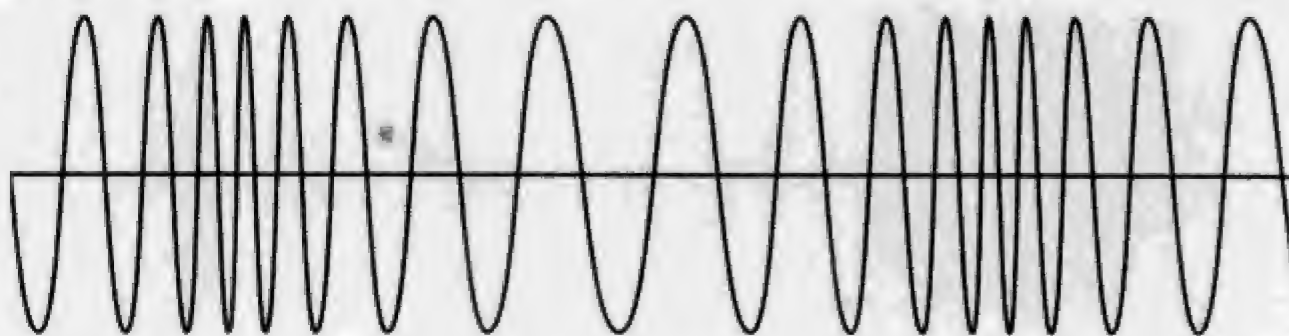


(a) 载 波



(b) 信 号

●图5.A1 频率调制的原理



(c) FM调制波

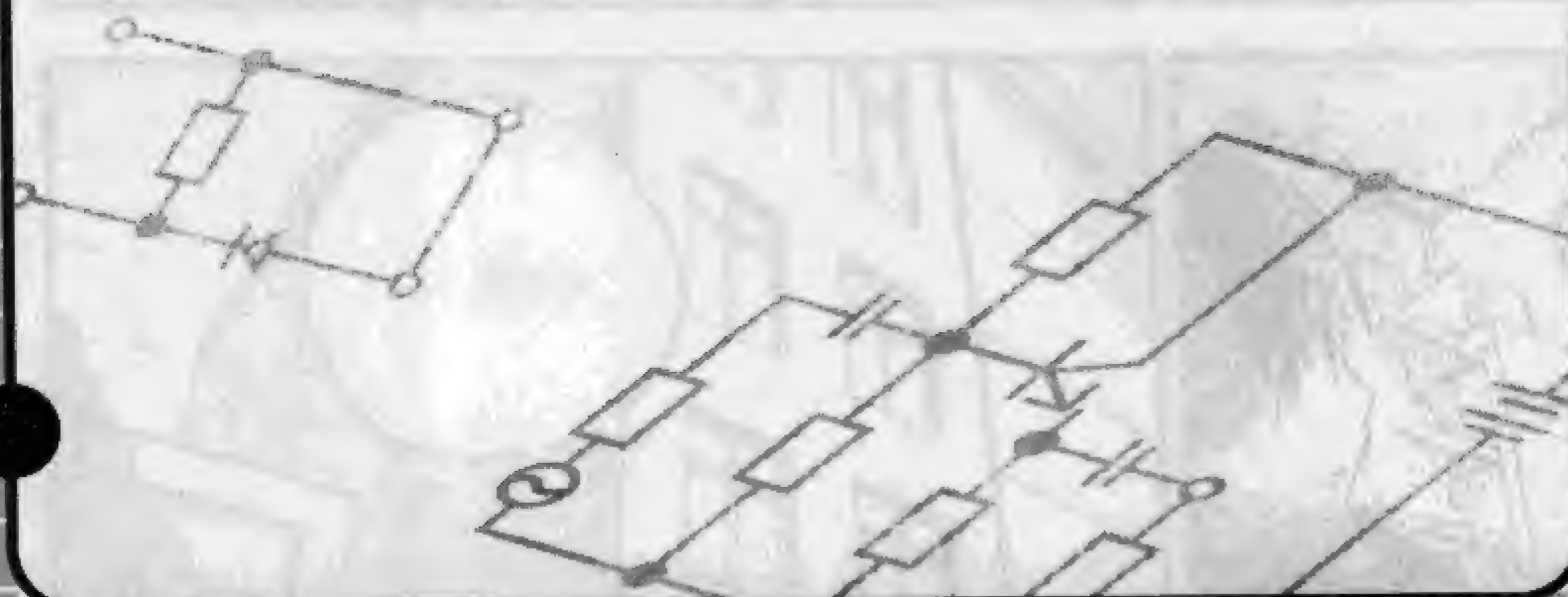
●图5.A1 (续)

这样，FM 调制波就是振幅一定、频率会时时刻刻变化。即使将噪音重叠在 FM 调制波上，只要了解频率的疏密程度就可以进行检波，所以可以说它对噪音是有抵抗力的。同时，FM 的情况时，因与邻接频道的关系可以取得 100kHz 的波段范围，所以它可以覆盖声音信号的频率波段。因此，与 AM 相比较而言，FM 可以说适合音乐的播放，因为它不受噪音的影响且频率波段范围较大。

FM 调制与 LC 振荡器，根据信号来相应变化 L （线圈的电感值）或者 C （电容的容量值）就可进行调制。无线传声器等，就是利用可变容量二极管来变化 C 的值进行 FM 调制的。

第6章

低频放大电路



从那以后一周
过去了。



您拨打的电话
无法接通。



那天以来，
她不再来参加社
团活动了。

小绫是不打算再
来了吗？



回家吧.....





你在干什么!!?

是我不对，突然发脾气并大声斥责她。



啊啊啊啊

当时我为什么会失去理智呢?



她也不接我的电话……

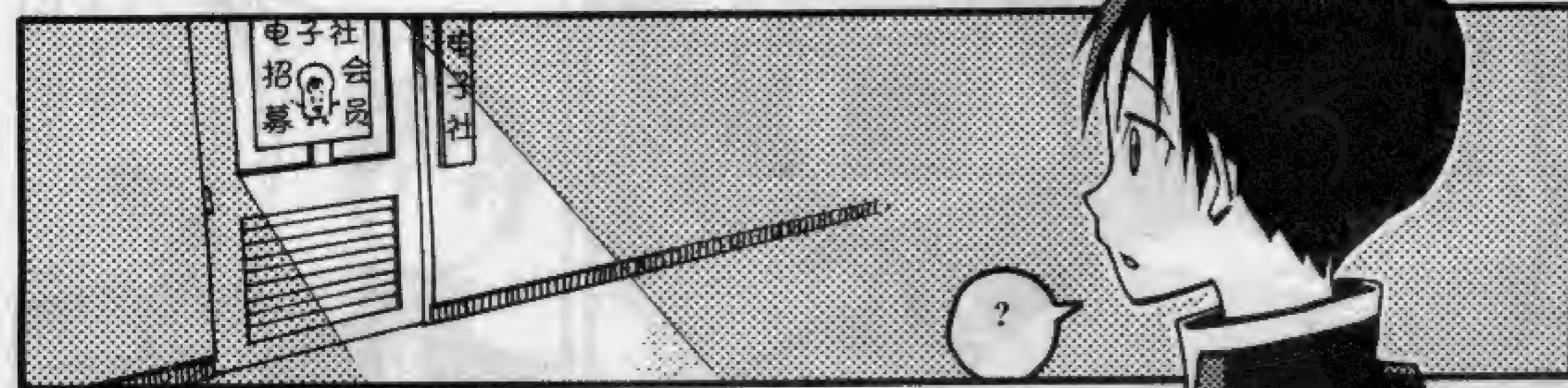
喂



啊，怎么没有?

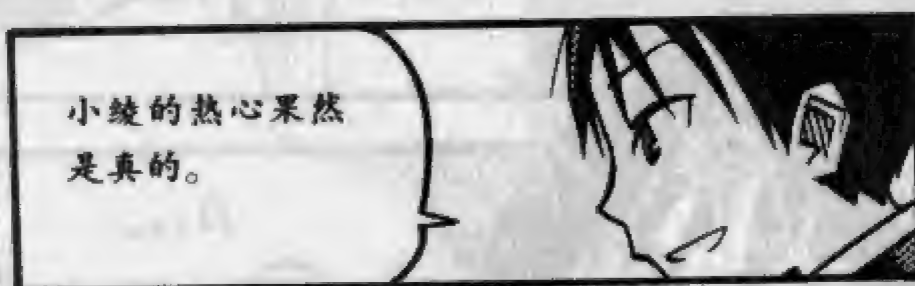


难道是落在社团室了?!



?





1. 低频放大电路的概念



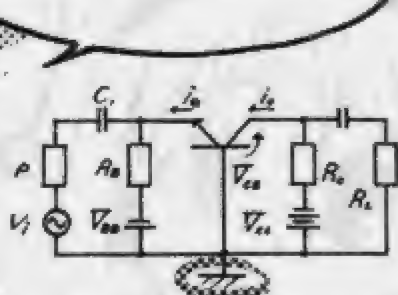
< 3 个类型的放大电路 >

低频放大
电路有 3
个类型。

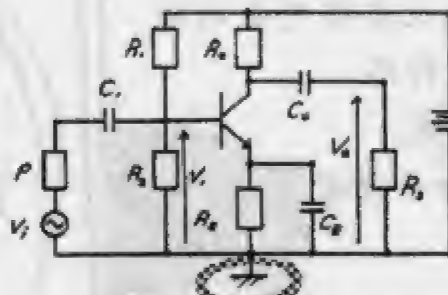
1. 基极接地放大电路
2. 发射极接地放大电路
3. 集电极接地放大电路

它们不同在哪里？

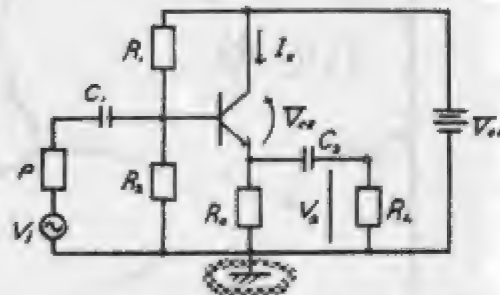
接地的地方不同。



基极接地放大电路



发射极接地放大电路



集电极接地放大电路

信号的放大程度
不同。

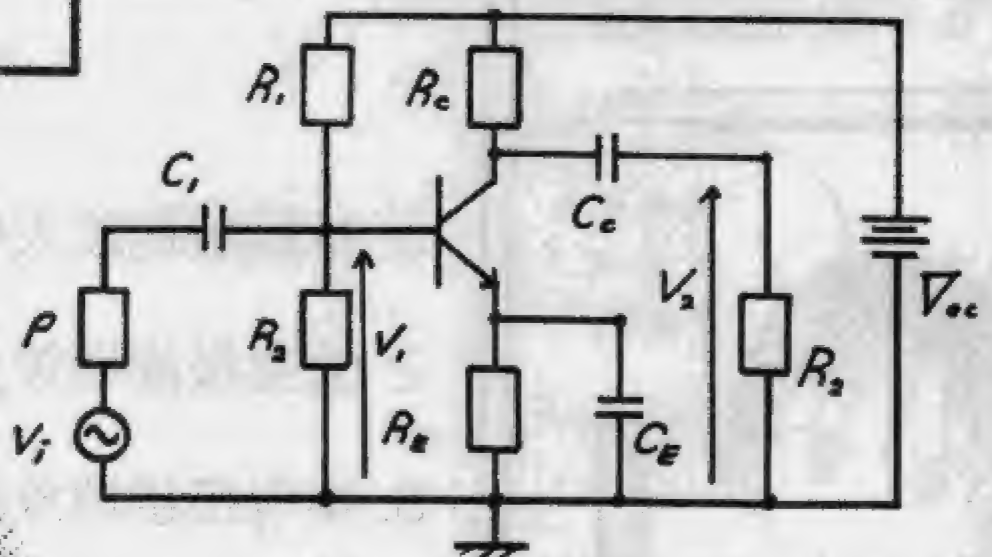
其中，

通过将发射极接地放大电
路与集电极接地放大电路
两个组合起来就可以使收
音机发出声音。

现在，我来说明
一下这两个吧。

好的。

2. 发射极接地放大电路



●图 6.1 发射极接地放大电路

这就是发射极接地放大电路。

如使用此电路，输出电流会变为输入电流的 100 倍。

太厉害了！
100 倍！！

看似，只要这样就可以获得充分的放大作用。
但是……

哈

怎么会……
这不对吗？

乐极生悲！？

实际上，由于
输出阻抗较大，

即使这样连接到扩音器也不会发出声音。

哎呀！

哈 扩音器

发射极接地
放大电路

2.1 等效电路

先求得等效电路，

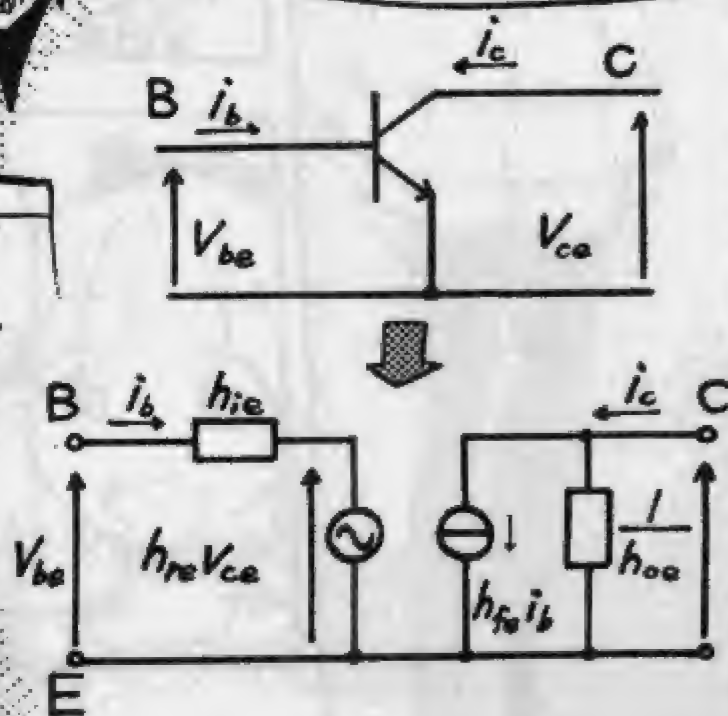
求得电流放大率
和输出阻抗来说
明发不出声音的
原因吧。

唉？

等效电路是什么啊？

等效电路，

就是指将晶体管替换到电阻
(R)、线圈(L)、电容(C)和电
源上，改画成像电气电路一样的
电路。

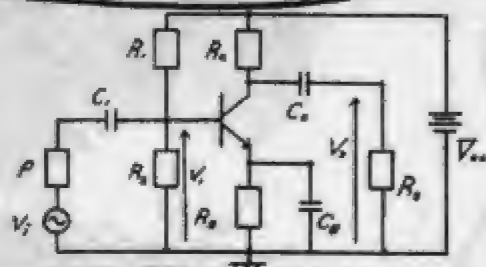


为什么要特意那么做呢？

加入晶体管进行电路
分析，这是解决此问
题的方法。

2.2 偏压电路

在图 6.1 中，直流电源与交流电源混在一起不容易看懂吧。



因此，我们将直流电源与交流电源分开来看。

这样就很清楚了！

这样只抽出直流电路的就叫做偏压电路。

这时，在图 6.1 中电容的阻抗在直流中则变得无限大。

这样的话，就在有电容的地方，电路会被断开吧。

抽出直流成分后的情况

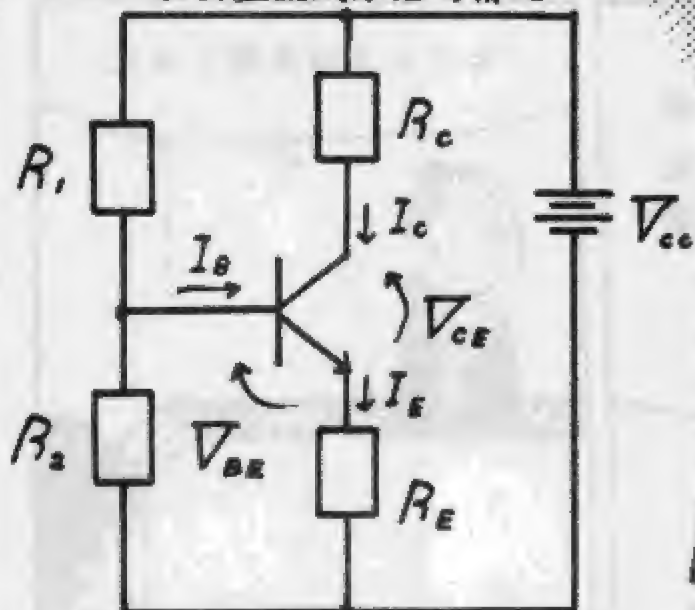
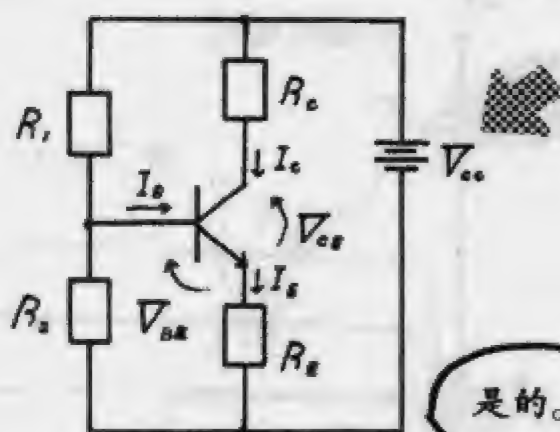


图 6.2 发射极接地放大电路的偏压电路

看这偏压电路 (图 6.2)
只有 1 个直流电源吧。



是的。

因此,

用 R_1 与 R_2 将直流电源电压 V_{CC} 分压, 晶体管则总是 ON 的状态。

在这里如果利用基尔霍夫定律。

$$V_{CC} = R_C I_C + V_{CE} + R_E I_E$$

则是这样的。

另外, 假设流入集电极的电子几乎都会流入发射极, 则 $I_C \approx I_E$ 。

$$V_{CC} = V_{CE} + (R_C + R_E) I_C$$

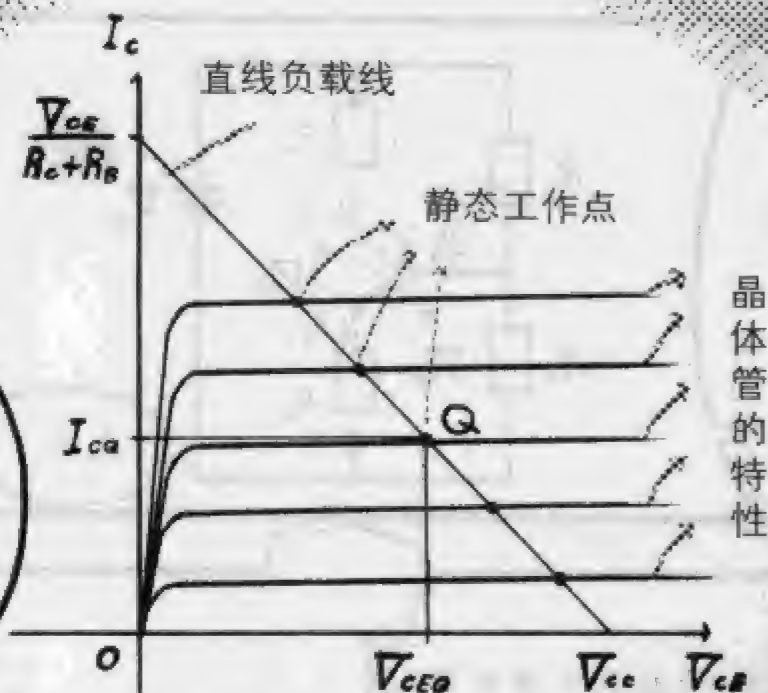
则会是这样吧。

<何为静态工作点>

刚才的公式

$V_{CC} = V_{CE} + (R_C + R_E)I_C$ 中,

如图 6.3 所示的是以 V_{CC} 为横轴、 I_C 为纵轴的一次函数的直流负载线。

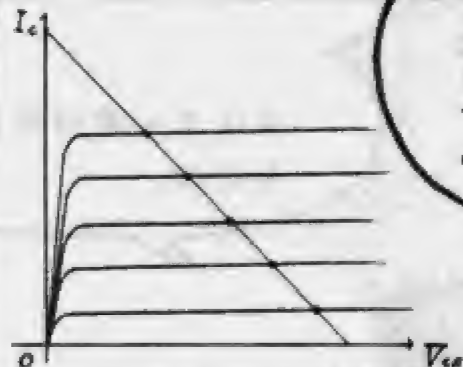


晶体管的特性

图 6.3 直流负载线

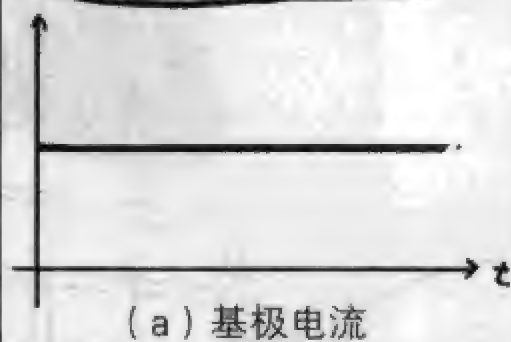
此图中，晶体管中的 V_{CC} 与 I_C 的特性曲线相配合所显示的 2 线的交点就叫做静态工作点。

图中有 5 个呢。



以这个静态工作点为中心。

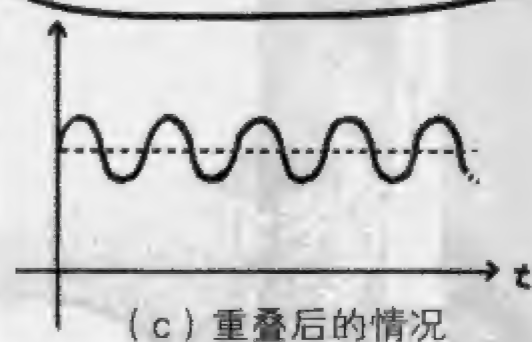
在基极电流上



将交流信号



重叠



这样做就可以起到放大的作用。

原来如此啊。

< 最佳静态工作点 >

需要注意静态工作点 Q 的位置。

是吗？

如果静态工作点靠近边缘，
偏离负载线的部分的波形会
变形。

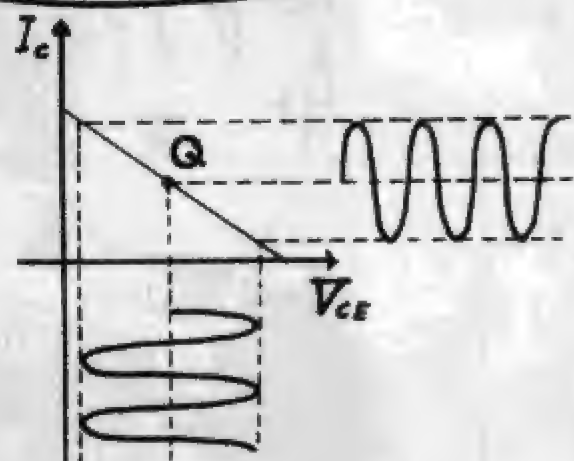
求得此最佳静态工作
点 Q 的算式是这样的。



●图 6.4 发生变形时的 V_{CE} 与 I_C 的情况

因此，

如图 6.5 所示，需要尽量
用最佳静态工作点。



●图 6.5 没有变形时的 V_{CE} 与 I_C 的情况

$$V_{CEQ} = \frac{1}{2} V_{CC}$$

$$I_{CQ} = \frac{V_{CC}}{2(R_C + R_E)}$$



2.3 交流放大电路



直流之后, 我们来想一下交流成分吧。

好的。



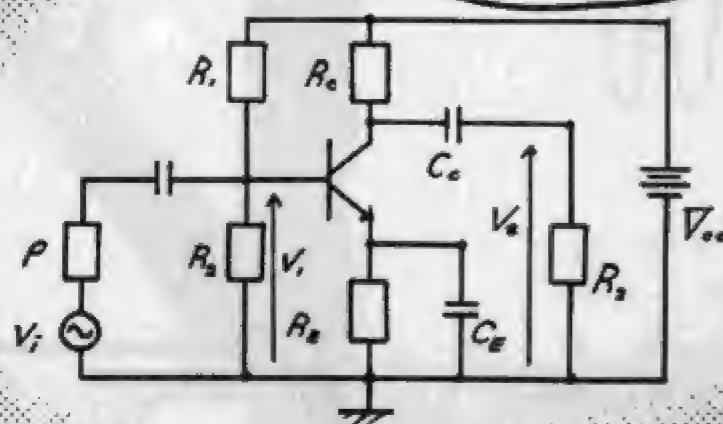
为此, 需要得出交流等效电路。



是的,

同时要分解图 6.1 吧。

那样可得出电流放大率与输出阻抗。

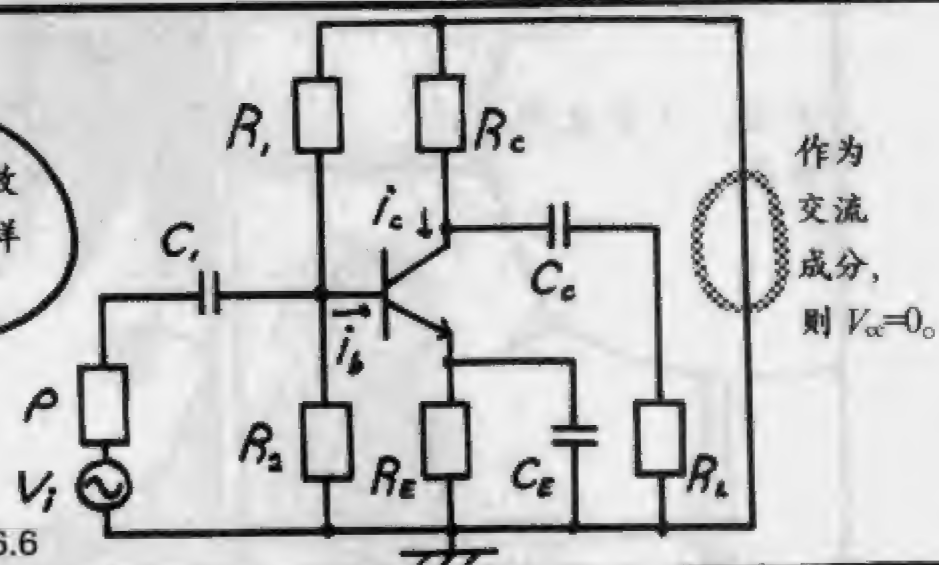


< 交流成分的等效电路 >

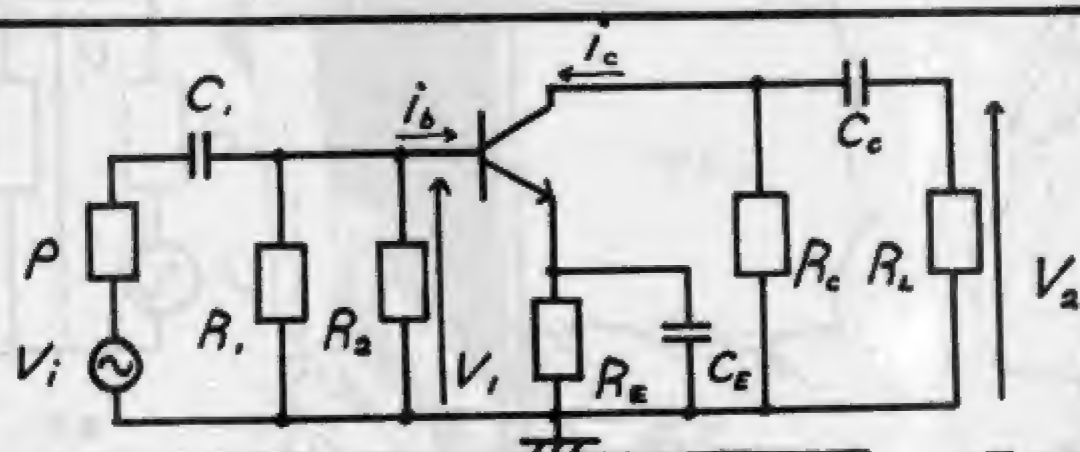


交流成分的等效电路要按照这样的顺序来制作。

●图 6.6



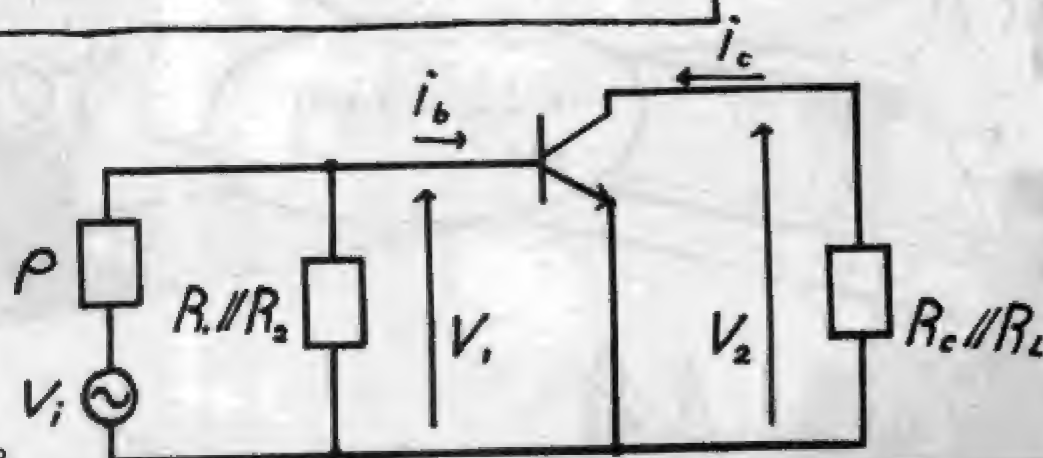
1. 直流电源 V_{CC} 中没有交流成分, 可以将其看作短路。



●图 6.7

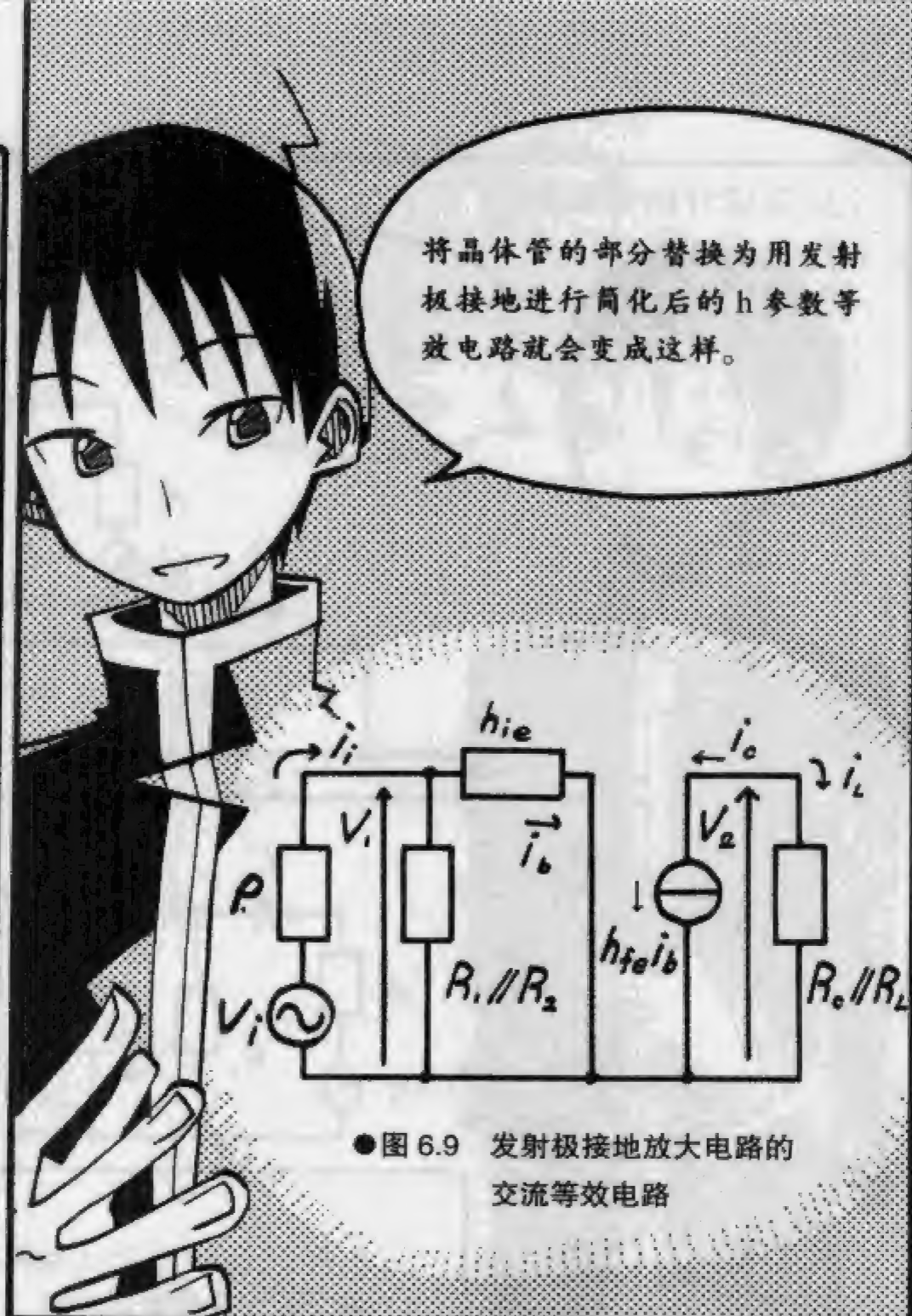
2. R_1 上端与 R_C 的上端同接地的电位相同, 所以可以这样重新画图。

3. 如果认为电容的容量无限大, 也可以将其看作短路。



●图 6.8





2.4 电流放大率

下面我来说明一下
电流放大率。

?

那是什么呀?

电流放大率 A_i 表示的是输出
电流 i_L 为输入电流 i_i 的
几倍。

$$i_L = A_i i_i$$

输出电流 电流放大率 输入电流

如果 A_i 为 1 以上,

$$i_L = A_i i_i$$

那么输出比输入大。

是的, 就是说, $A > 1$ 时, 可以说电流被放大了。

太棒了!

我现在来讲解它的原理。

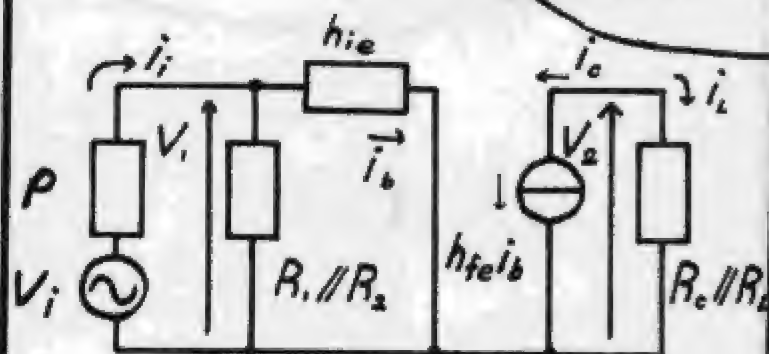
但为此，必须从图 69 的交流等效电路中得出输入电流 i_i 与输出电流 i_L 的关系。

啊！

电流放大率 A_i 用输入电流 i_i 与输出电流 i_L 之比来表示。

$$A_i = \frac{i_L}{i_i} = \frac{i_b}{i_i} \cdot \frac{i_c}{i_b} \cdot \frac{i_L}{i_c}$$

与 h_{ie} 中流动的电流相比， $R_1 // R_2$ 中流动的电流是非常小的。



同时，一般来说， $R_1 // R_2$ 为几千欧[姆]，而 h_{ie} 为几十欧[姆]，所以从电源 V 流出的电流几乎都会流入 h_{ie} 。

于是，因为

$$\begin{aligned} i_i &= i_b \\ i_L &= -i_c \\ &= -h_{fe} \cdot i_b \end{aligned}$$

则 $A_i = -h_{fe}$

而且 h_{fe} 为

$$h_{fe} = \beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

可以这样计算。

< 基极接地流放大率 >

这里说的 α 是基极接地
电流放大系数，大体上晶
体管都取值为 $0.95 < \alpha <$
 1.0 。

无限接近 1 是吧！

例如代入 $\alpha=0.99$
的数值， A_i 为……

喂，喂

$$A_i = \frac{0.99}{1-0.99}$$

$$A_i = -99$$

嗯！

由此，可以说负荷电
流 i_L 是输入电流 i_i 的
大约 100 倍。

原来如此！所以
是 100 倍啊。

＜相位的反转＞

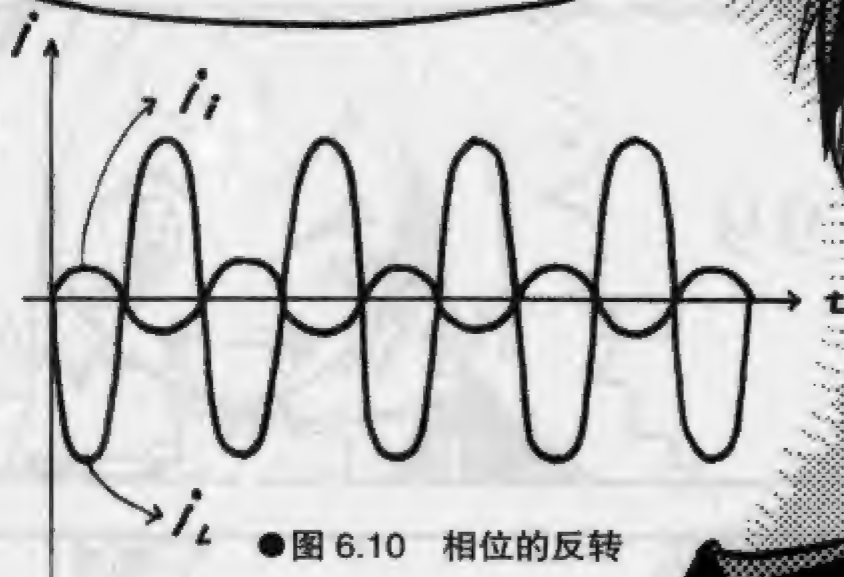
因为输出电流比输入电流大，所以可以说具备放大作用。

知道了。

其实，

但仔细看的话，电流放大率 A_i 的值却是负的！！我真是不明白！！

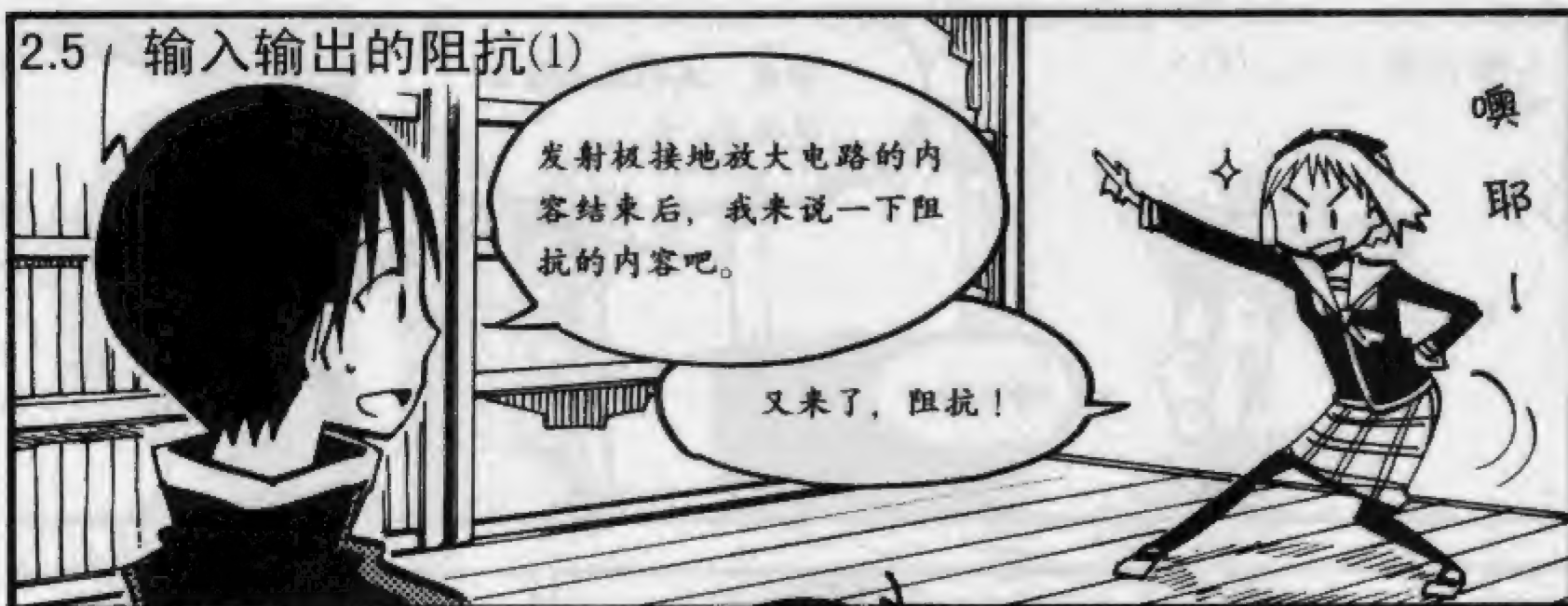
A_i 为负是因为输入信号与相位是反转的。



学长与我的相位不也是反转的吗？

小綾，你在做什么？

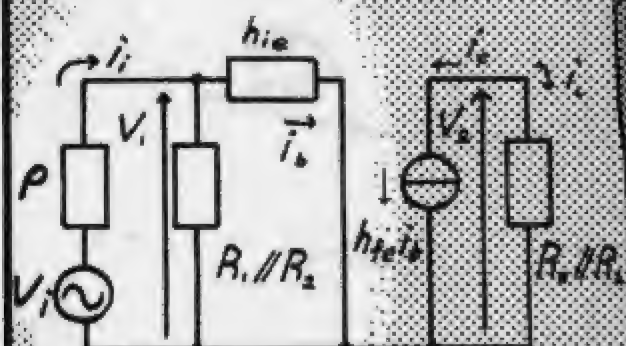
2.5 输入输出的阻抗(1)



<输入阻抗 Z_{in} (1)>

首先, 输入阻抗 Z_{in} 是从输入一侧来看的, 因此只需注视图 6.9 的左半部分。

公式是这样的。



$$Z_{in} = R_1 // R_2 // h_{ie}$$

为什么不包含 ρ 呢?

ρ 是输入信号源 v_i 的内部电阻, v_i 与 ρ 可作为一体考虑, 所以不包含 ρ 。

< 输出阻抗 Z_{out} (1) >

接着，我们来看输出阻抗 Z_{out} 吧。

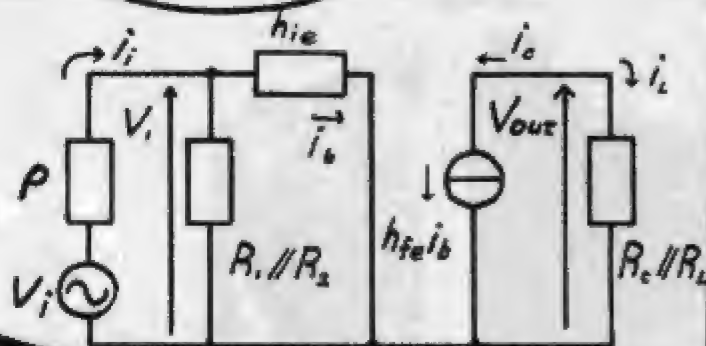
哈哈哈 ♥

是这样的吗？

Z_{out} 为在输入信号 V_i 的值为 0 时，从输出端子 R_L 来看的阻抗。

这时， V_i 的值为 0，所以 $i_b=0$ 。

那样的话，从输出端来看的话，电流则是不会流动的。



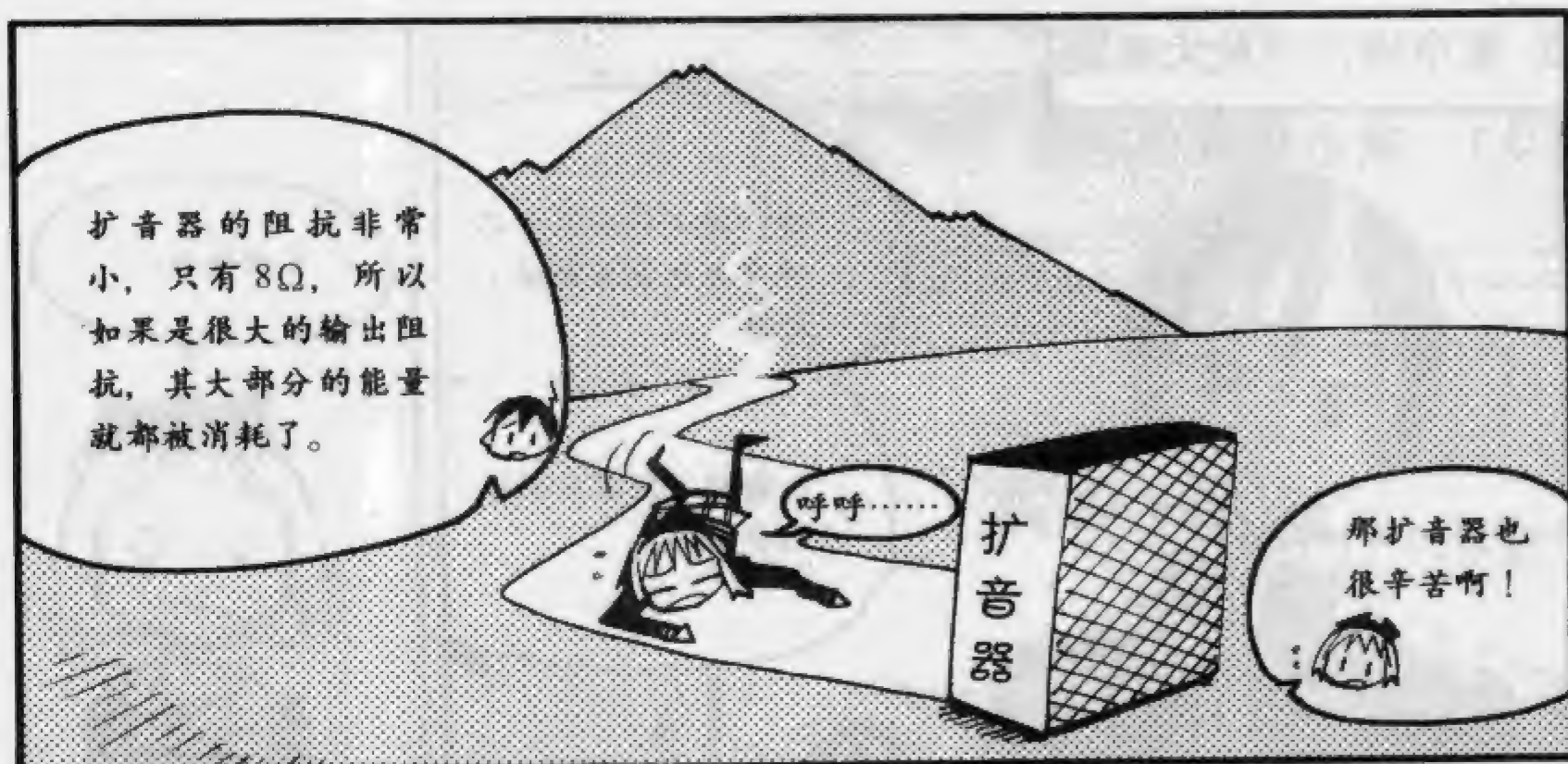
电流源 $-h_{fe}i_b=0(=i_c)$

公式是这样的。

$$Z_{out} = \frac{V_{out}}{-i_c} \Big|_{v_i=0} \rightarrow \infty$$

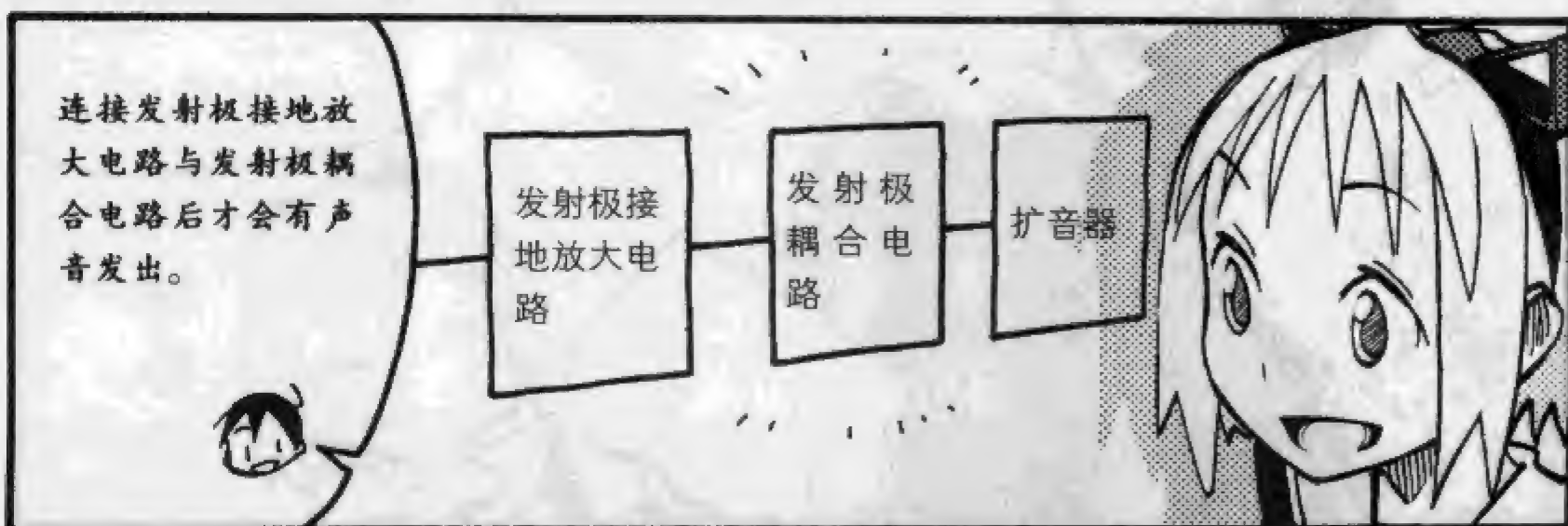
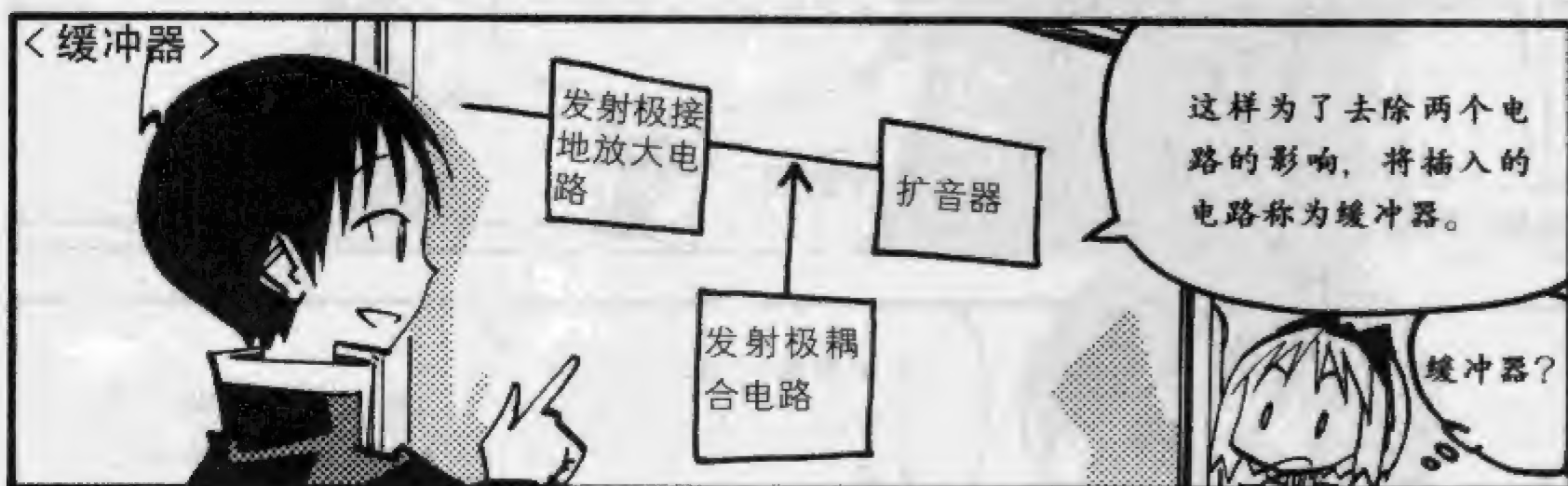
这样，输入阻抗如显示为非常大的值，即使连接扩音器也不会发出声音。

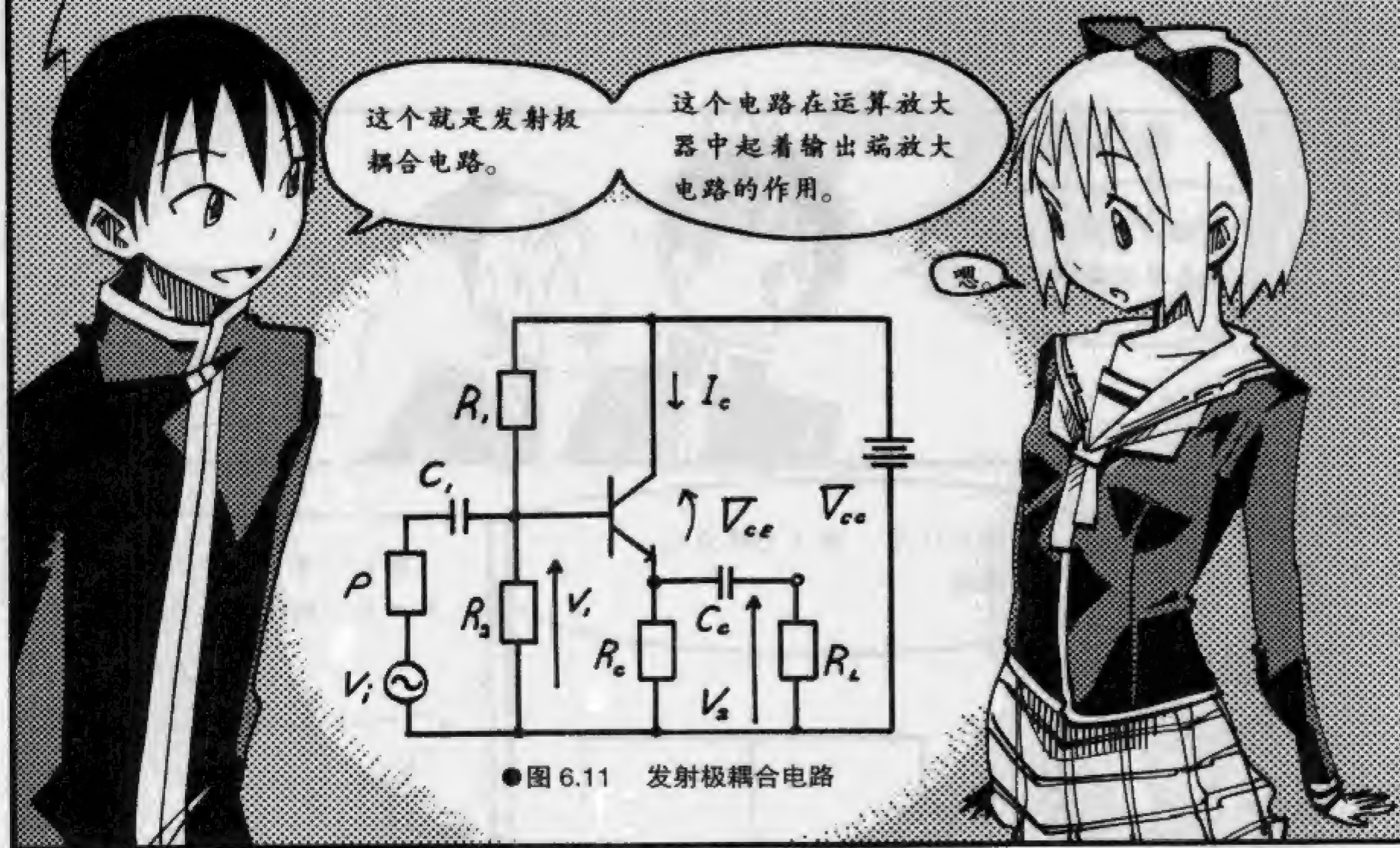
唉？为什么？



3. 集电极接地放大电路

3.1 发射极耦合电路





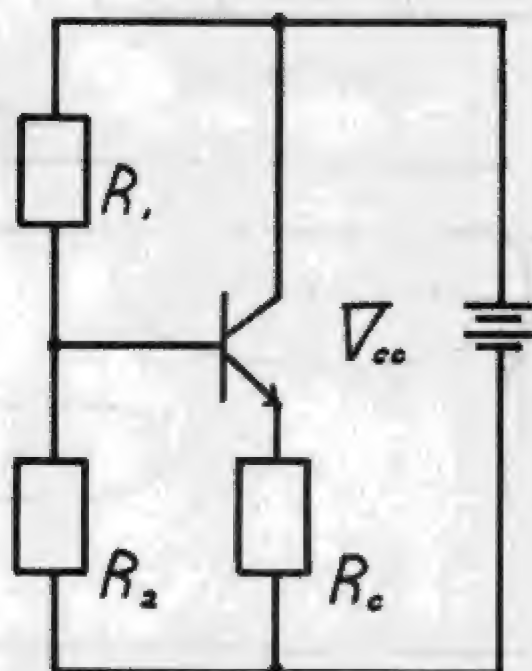
3.2 偏压的设定

我们通过对发射极耦合电路来得出偏压吧。

太近了！

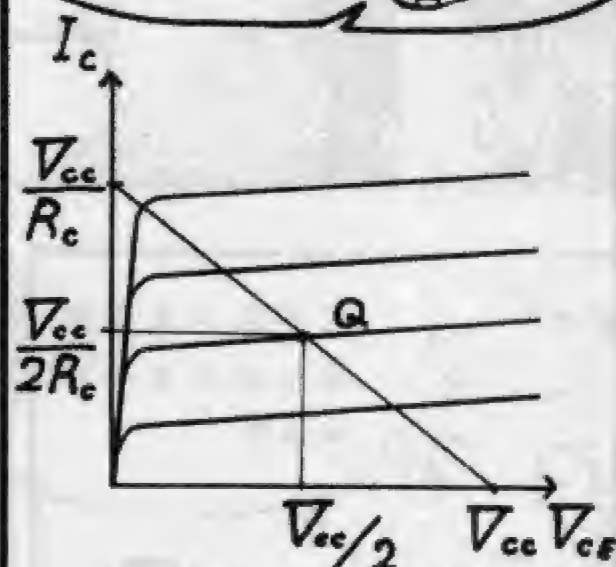
是直流成分吧！

图 6.11 中，偏压电路是这样的。



●图 6.13 发射极耦合电路的直流成分

在图 6.12 中，用于决定静态工作点的直流负载线为



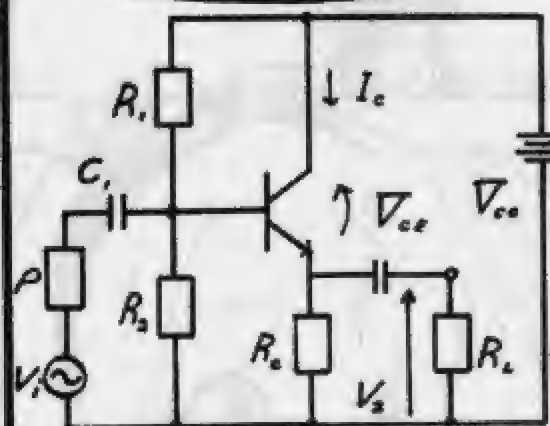
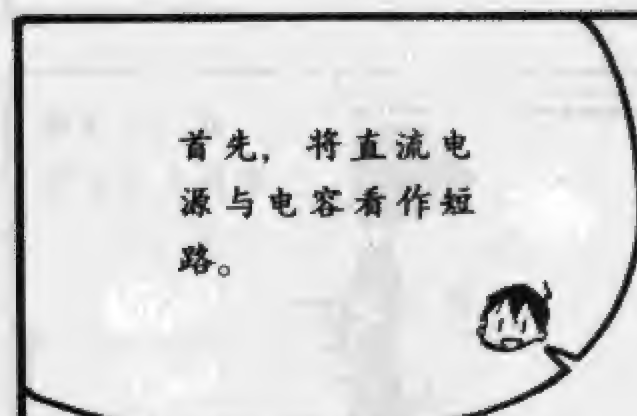
●图 6.14 发射极耦合电路的直流负载线

此图中最佳的静态工作点 Q。

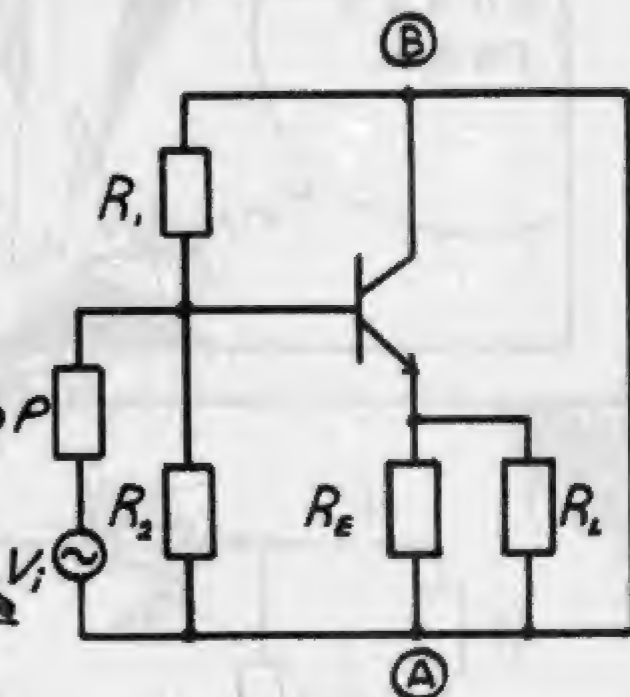
公式为：

$$V_{CEQ} = \frac{V_{CC}}{2}, I_{CQ} = \frac{V_{CC}}{2R_E}$$

3.3 交流等效电路



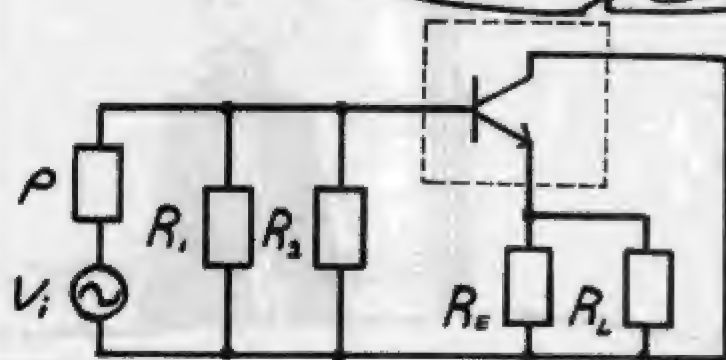
●图 6.15 发射极耦合电路



●图 6.15(a) 将电容与直流电源看作短路



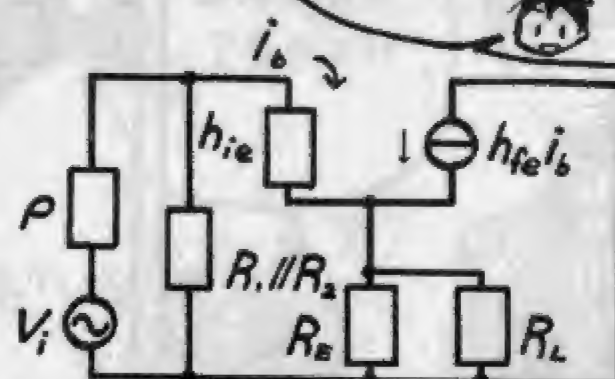
A 与 B 因电位相同，图 6.15 (a) 可以这样重新画图。



● 图 6.15(b)

并且，将 6.15 (b) 的虚线围住的部分……

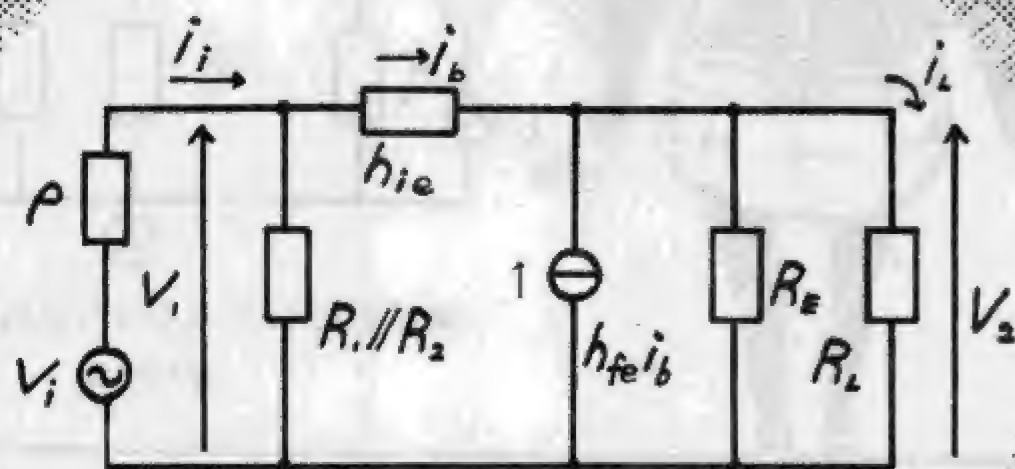
晶体管的部分重新画为发射极接地的 h 参数等效电路。



● 图 6.15(c)

这样有点看不清楚呀。

嗯，我们来重新画图使负载电阻 R_L 出现在右边。



● 图 6.15(d)

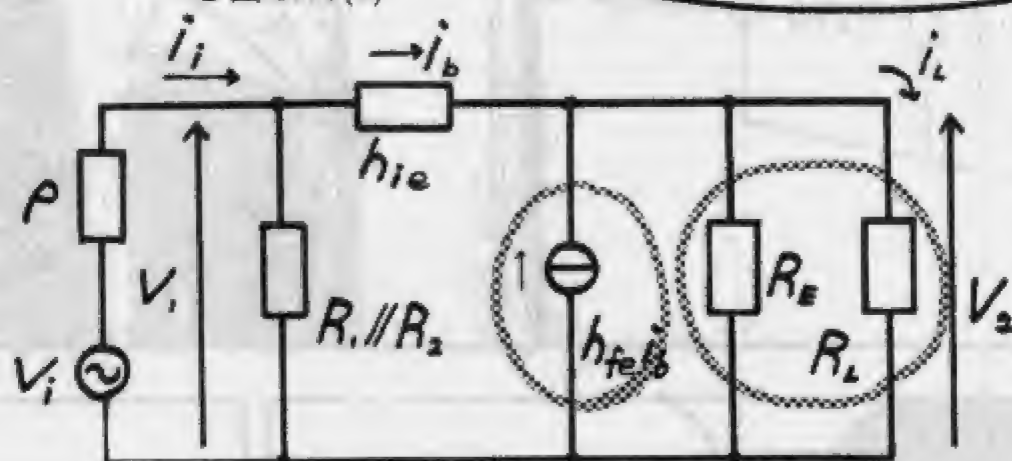
这样就相当清楚了。

图 6.15 (d) 中存在电流源 $h_{fe}i_b$, 与 $R_E//R_L$ 相适应, 流动着名为 $i_b(1+h_{fe})$ 的电源。

是的。

因此, 为了从图 6-15 (d) 重新画成没有电流源的, 只要使电流 i_b 流入 $R_E//R_L(1+h_{fe})$ 就可以了。

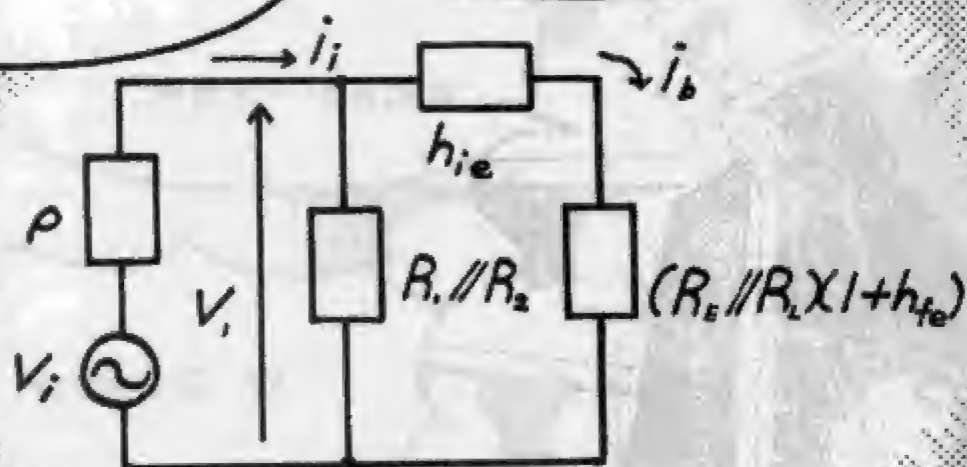
●图 6.15(e)



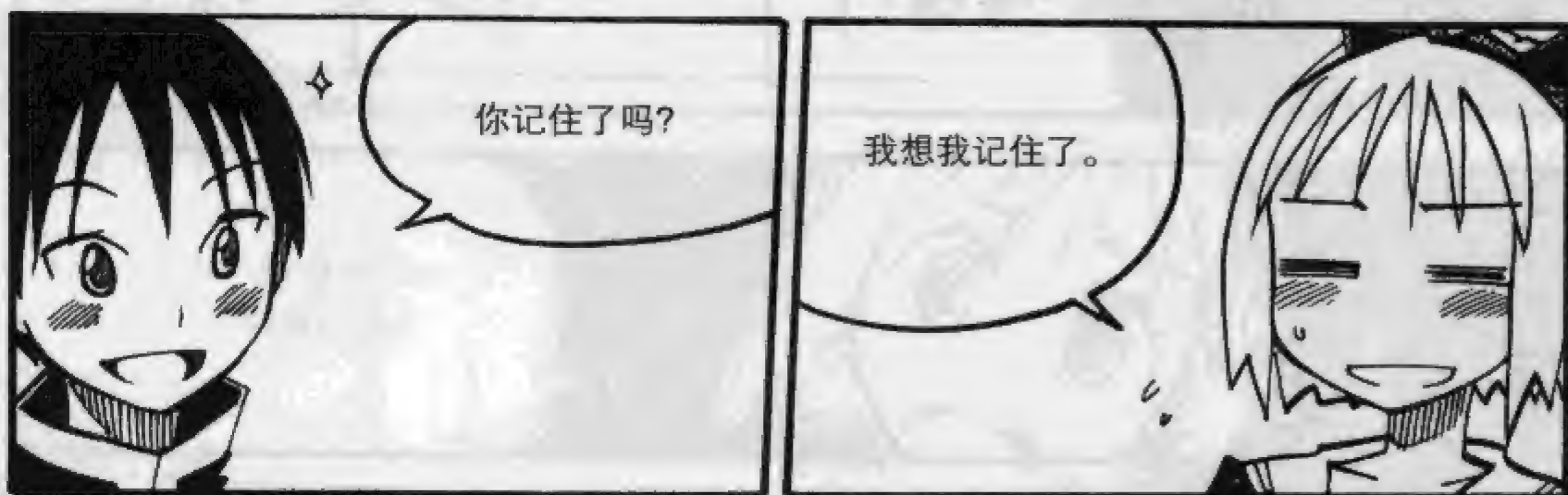
那就是说……
怎么回事呀?

如果电流 i_b 流入 $R_E//R_L(1+h_{fe})$ 的话,

这样等效电路就会变得简单了。



●图 6.15(f)



3.4 电压放大率和电流放大率 < 电压放大率 >

接着，我们
来求出电流
放大率吧。

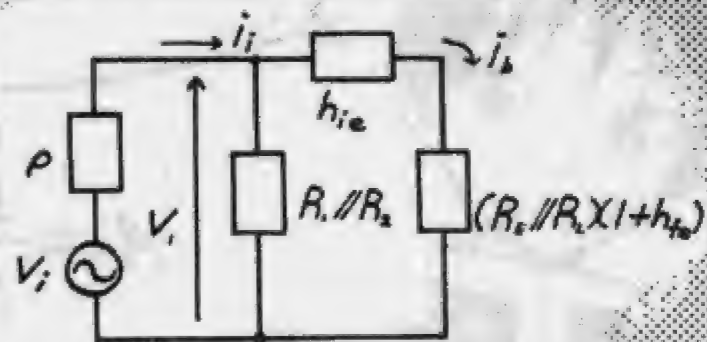
好的。

但那之前，必须在发射
极耦合电路中求出电压
放大率。

啊……

在图 6.15 (d) 中，输
入电压为 v_1 ，输出电压
为 v_2 ，就是说，

如将其考虑为出
现在 $R_E // R_L (1 + h_{ie})$
的电压，电压放
大率则



$$A_v = \frac{v_2}{v_1} \approx 1$$

是这样的。

因此，就可以得到
与输入信号电压相
同的输出信号。

哦！

< 电流放大率 >

我前面讲过电流放大率 A_i 是输入电流 i_i 与流入负荷电阻 R_L 的电流 i_L 之比吧。

是的，那个我还记得。

也就是说，发射极耦合电路中的电流放大率

$$A_i = \frac{i_L}{i_i} = 1 + h_{fe}$$

是这样的。

h_{fe} 的值在 50~100 之间，因此将输入信号的电流大小增大 50~100 倍就可以使之变为输出信号。

原来如此！

因此它才是放大吧！

嗯！

3.5 输入输出的阻抗(2)

< 输入的阻抗 Z_{in} (2) >

那么，
最后来说
.....

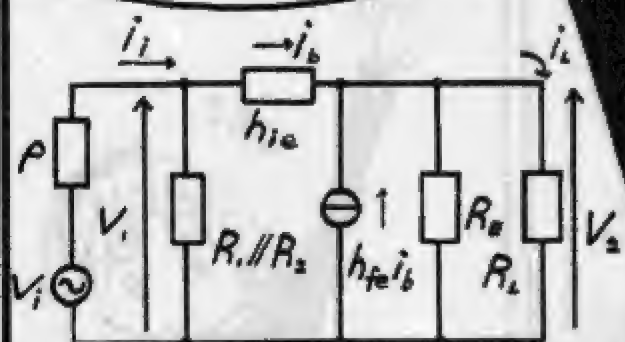
阻抗！

噢耶

首先从输入阻抗开始吧！

好的。

图输入阻抗 Z_{in} 是从图
6.15 (d) 边缘来看的
阻抗，



$$\left(= \frac{v_1}{i_b} \right)$$

$$Z_{in} \approx h_{ie} + (1 + h_{fe})(R_E // R_L)$$

这样可以说它的大小程
度为 $R_E // R_L$ 的 100 倍。

也就是说，它适合连接在发
射极接地放大电路或基极接
地放大电路的输出端吧。

哈

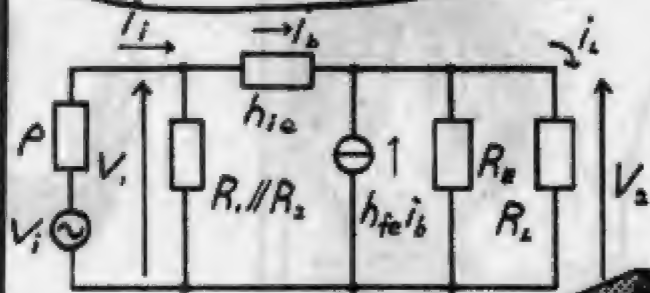
哈

< 输出阻抗 Z_{out} (2) >

接下来是输出阻抗。

Oh Yeah!

从图 6.15(d) 的 $(1+h_{fe})(R_E//R_L)$ 来看, 输出阻抗 Z_{out} 在左侧。



但是, 即使 $V_i=0$, 也不会是 $i_b=0$, 所以输出阻抗 Z_{out} 不会变为无限大。

也就是说, 它是这样的。

$$Z_{out} = \frac{v_{out}}{i_{out}} = \frac{h_{ie} + \rho // R_1 // R_2}{1 + h_{fe}} (\approx h_{ib})$$

与发射极接地放大电路的输出阻抗相比, 发射极耦合电路的输出阻抗 Z_{out} 的值非常小。

000



补充知识



▶ 与分贝 (dB) 的关系

那么, 关于发射极接地放大电路的电流放大率 A_i



这样来处理。

$$A_i = 20 \lg \left| \frac{i_L}{i_i} \right|$$

这时的单位则为 dB(分贝)。所谓分贝是指信号与噪音之比的 S/N 或用于表示声音强度等的单位。

例如, dB 若为 0, 则输入信号与输出信号大小相同, 但 dB 若为 20, 输出信号的大小是输入信号的 10 倍。dB 若为 40, 可以说输出信号的大小为输入信号的 100 倍。

因此, 如图 6.1 所示, 可以说发射极接地放大电路的电流放大率在 $h_{fe}=100$ 时为 40dB。

▶ 为什么发射极耦合电路是必需的

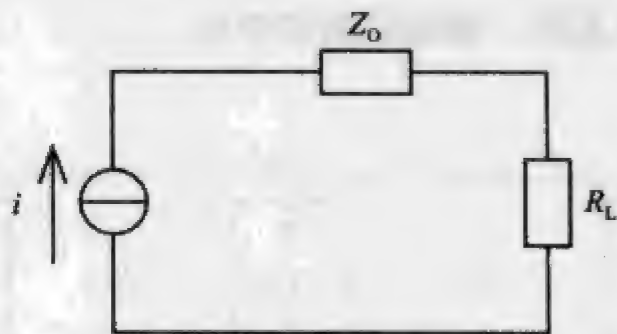
其理由在于: 在发射极接地放大电路中, 因电阻而消耗的功率为 $P=I^2R$ 。

也就是说, 如图 6.1 所示, 输出阻抗 Z_o 与负荷电阻 R_L 形成相连接的状态, 但起扩音器作用的负荷电阻 R_L 的大小与输出阻抗相比非常小, 因此将流入扩音器及输出阻抗的电流看作一样的话, 就可以说扩音器所消耗的电力与输出阻抗所消耗的电力相比则是非常少的。因此, 扩音器用来转换声音的能量则几乎没有了。

也就是说, 电路整体的能量并不是由扩音器、而是由输出阻抗消耗掉的, 因此因扩音器即形成声音的能量而被消耗的电力几乎没有了。

因此, 就按照现在这样, 声音是不会从扩音器发出来的, 所以发射极接地放大电路作为放大电路是不够的。

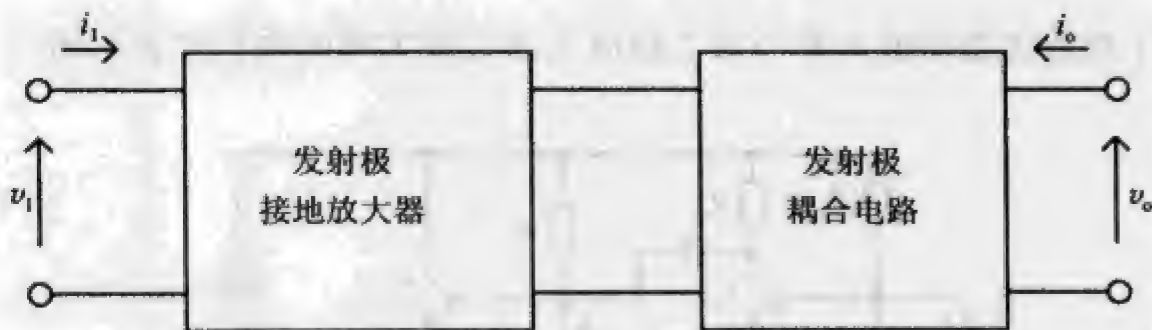
顺便一提，一般认为扩音器的一般阻抗的大小为 $8\ \Omega$ ，而发射极接地放大电路的输出阻抗的实用数值则为 $300\text{k}\ \Omega$ 。



●图6.A1 输出阻抗 Z_o 与负荷电阻 R_L

▶ 将发射极耦合电路级联连接

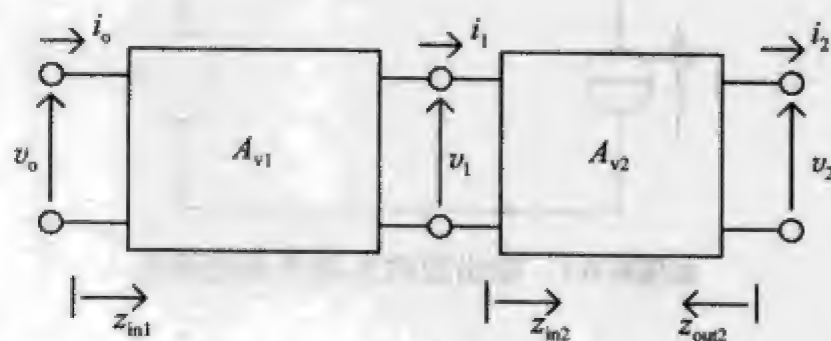
如图 6-A2 所示，将发射极接地放大电路与发射耦合电路连接时，整体的电流放大率用发射极接地放大器的电流放大率与发射极耦合电路的电流放大率的乘积来表示。因此，各自的电流放大率即使为 100 时，2 个相乘则成为 10000，因此可了解其作为放大率是非常大的。



●图6.A2 发射极接地放大电路与发射极耦合电路的级联连接

▶ 放大器的级联连接

在本章中, 利用放大器说明了级联连接发射极接地放大电路与发射极耦合电路的内容。下面来说明电流放大率、输入阻抗、输出阻抗的情况。

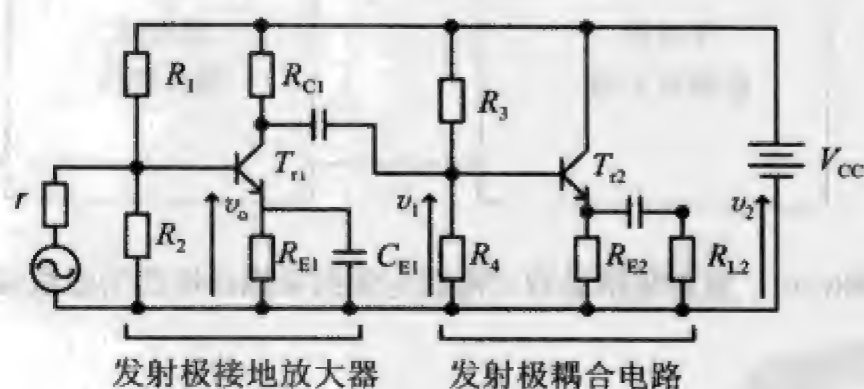


● 图6.A3 放大器的级联连接的概念

图 6.A3 时的电流放大率公式可以表示为

$$A_i = \frac{i_2}{i_0} = \frac{i_1}{i_0} \cdot \frac{i_2}{i_1} = A_{i1} \cdot A_{i2}$$

它是用第 1 级放大器的放大率与第 2 级放大器的放大率的乘积来表示的。



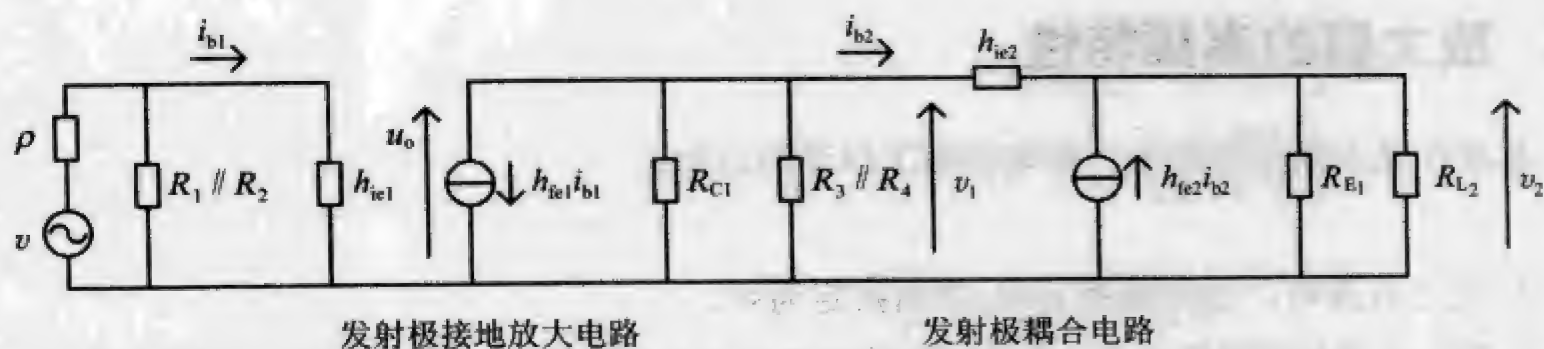
● 图6.A4 发射极接地放大电路与发射极耦合电路的级联连接

因此, 如图 6-A4 所示, 在发射极接地放大电路与发射极耦合电路的级联连接电路中

级联连接电路的电压放大率 = 发射极接地放大电路的电压放大率

× 发射极耦合电路的电压放大率

的关系近似成立。这个说“近似”的理由在于: 其各自的输入阻抗、输出阻抗、偏压电阻都是有限的, 所以并不意味着完全一样。



●图6.A5 图6.A4的交流等效电路

在此电路中，若着眼于发射极接地放大电路，发射极耦合电路的输入阻抗定为 Z_{ic1} ，则

$$i_0 = i_{b1}$$

$$i_1 = i_{b2} = -h_{fe1} i_{b1} \frac{R_{c1} // R_3 // R_4}{R_{c1} // R_3 // R_4 + Z_{ic1}}$$

$$A_{i1} = \frac{i_1}{i_0} = -h_{fe1} \frac{R_{c1} // R_3 // R_4}{R_{c1} // R_3 // R_4 + Z_{ic1}}$$

因此，严格来讲，此 A_{i1} 与发射极接地放大电路求得的 A_i 并不一致，只是， $R_{c1} // R_3 // R_4 > Z_{ic1}$ 时，可以看作 $A_{i1} = -h_{fe}$ 。

同时，关于发射极耦合电路的部分如前所述， $A_{i2} = 1 + h_{fe}$ 。因此，此级联连接电路的电流放大率 A_i 为

$$A_i = A_{i1} A_{i2} = -h_{fe1} (1 + h_{fe2}) \frac{R_{c1} // R_3 // R_4}{R_{c1} // R_3 // R_4 + Z_{ic1}} \approx -h_{fe1} (1 + h_{fe2})$$

可以说这是各自放大器的放大率的乘积。

输入阻抗与在输入一侧连接的发射极接地放大电路的输入阻抗大致是相同的数值。一般认为其数值为 $3k\Omega$ 左右。

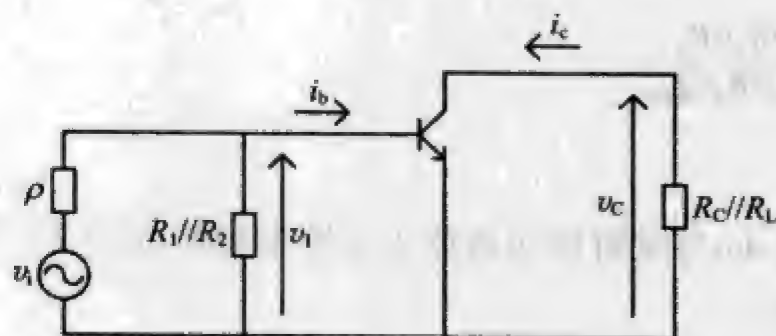
输出阻抗与在输出一侧连接的发射极耦合电路的输出阻抗大致是相同的数值。一般认为其数值为 35Ω 左右。

► 放大器的高频特性

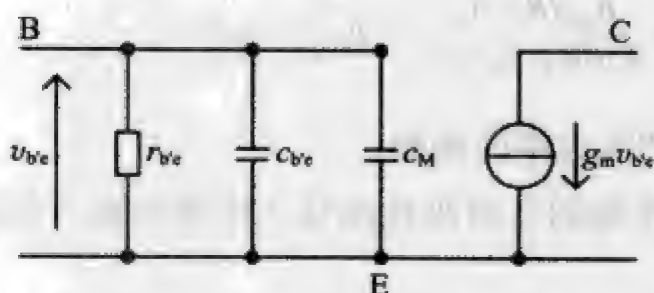
本章在放大器的分析上，对电容做了以下的近似。

- ① 关于直流电，因角频率 $\omega=0$ ，将阻抗定为 ∞ 。
- ② 假定电容的容量非常大，将交流电的阻抗定为 0（换言之，将电容的部分看作短路）。

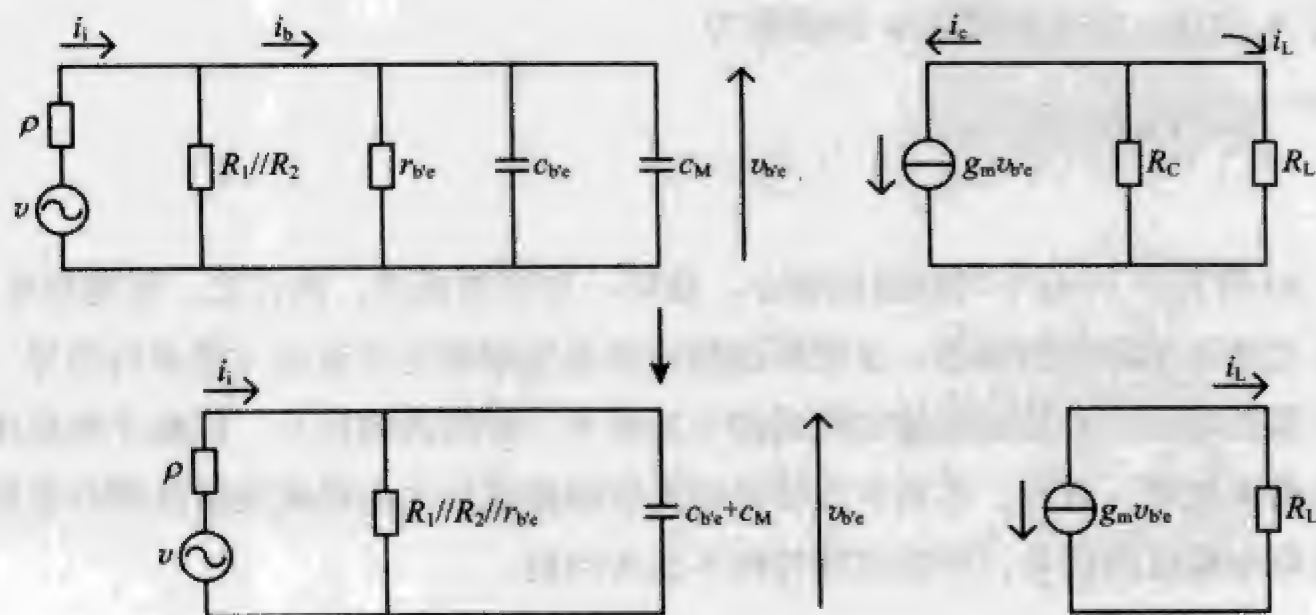
这两个近似，在电子电路的分析中有很重要的意义，也是为了使其分析更简单。但是，这些近似是有范围的。一般如果交流电的频率非常高，在晶体管的内部中空乏层明显起着电容的作用，换言之，普遍认为寄生容量的效果是不能忽视的。因此，在放大器的等效电路中安装起因于寄生容量的电容，则必须考虑放大率等因素。



●图6.A6 发射极接地放大电路的交流电成分



●图6.A7 晶体管的高频等效电路



●图6.A8 发射极接地放大电路的高频等效电路 ($R_c \gg R_L$)

例如，在如图 6.A6 所示的发射极接地放大电路中，将晶体管的部分替换为如图 6.A7 所示的含有寄生容量的高频等效电路，则如图 6.A8 所示，等效电路之中则会包含电容器。图 6.A7 的晶体管的高频等效电路中， C_{be} 为基极与发射极之间的寄生容量，在 C_M 基极与集电极之间的寄生容量中与镜子效应互相结合所形成的容量。这时的电流放大率 A_i 可以表示为如下的公式。

$$i_i = \left(\frac{1}{R_1 // R_2 // r_{be}} + j\omega(C_{be} + C_M) \right) v_{be}$$

$$i_L = -g_m v_{be} \frac{R_c}{R_c + R_L} \approx -g_m v_{be} (\because R_c \gg R_L)$$

$$A_i = \frac{-g_m(R_1 // R_2 // r_{be})}{1 + j\omega(C_{be} + C_M)(R_1 // R_2 // r_{be})}$$

仔细看 A_i 的话, 它为角频率 ω 的函数为

$$\omega = \frac{1}{(C_{be} + C_M)(R_1 // R_2 // r_{be})}$$

如上所述, A_i 的大小 $|A_i|$ 可以急剧减小。这样, 如变为高频, 换言之, 如角频率 ω 增大, 则会产生电流放大率降低的问题。这里所说的高频是指频率比声音也大很多的信号。因此, 用调谐放大器处理的信号是如想接收频道的电波频率一样的高频信号, 因此才将晶体管作为高频等效电路来处理。再者, 本章中所描述的发射极接地放大电路或发射极耦合电路, 因处理的是声音频率程度的信号, 所以高频特性不成为问题。



你还是感觉
困扰吗？

你真是相当喜
欢电子电路的
内容呢。

唉？！

如果与你一起的话，社
团活动会非常好。今后
请多关照……

笨蛋！

我
喜
欢
的
是
学
长
呀

！！！！

唉？

